



Pedro Regalado Melo
Rosa

Bengala de apoio a cegos com detecção de buracos





**Pedro Regalado Melo
Rosa**

Bengala de apoio a cegos com detecção de buracos

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. José Manuel Neto Vieira, Professor do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri / the jury

presidente / president

Maria Beatriz Alves de Sousa Santos

Professora Associada com Agregação do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Armando Jorge Miranda de Sousa

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

José Manuel Neto Vieira

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

João Manuel de Oliveira e Silva Rodrigues

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

**agradecimentos /
acknowledgements**

Gostaria de agradecer ao Professor José Manuel Neto Vieira e ao Professor João Manuel de Oliveira e Silva Rodrigues pela excelente orientação que me deram ao longo deste trabalho, oferecendo sempre grandes ideias e motivação.

Agradeço também ao Sr. Jorge Anjos pela sua disponibilidade para testar e opinar sobre a bengala.

Um obrigado muito especial para a turma da 317, que tornaram todas aquelas horas de trabalho num verdadeiro lazer.

Dirijo os meus últimos agradecimentos à minha família que sempre me apoiou.

Resumo

Este documento pretende descrever o trabalho realizado no sentido de desenvolver uma bengala de apoio a cegos que tivesse a capacidade de detectar buracos e desníveis no solo por meio de ultra-sons. Foram estudados alguns sistemas de apoio a cegos (tanto comerciais como em desenvolvimento) e entrevistados alguns invisuais de forma a compreender melhor quais as funcionalidades que podiam e deviam ser incluídas na bengala.

Tendo em conta que o desenvolvimento desta tecnologia já tinha sido iniciado anteriormente no âmbito de outro projecto e deverá continuar no futuro, foi construída uma plataforma de testes para medir e registar o atraso do sistema na detecção de desníveis. O núcleo do trabalho consistiu em desenvolver um algoritmo capaz de processar os sinais ultra-sónicos recebidos pela bengala e, a partir destes, detectar a presença de desníveis de forma rápida e fiável. Os ensaios realizados com a plataforma de testes apresentaram tempos de atraso reduzidos, viabilizando a implementação do algoritmo na bengala.

Construiu-se um protótipo da bengala para possibilitar o teste do algoritmo desenvolvido em ambientes reais. Alguns cegos experimentaram o protótipo e mostraram grande entusiasmo, pois todos os buracos e desníveis que apareceram no seu caminho foram detectados atempadamente pela bengala.

Apesar dos bons resultados obtidos, ainda ficaram alguns problemas por resolver. São então deixadas algumas sugestões para trabalho futuro, para que um dia esta tecnologia possa chegar às lojas e ajudar os cegos na sua vida.

Abstract

This document describes the work done in the development of a cane to help blind people which has the ability to detect gaps in the ground by using ultrasound. We studied some support systems for the blind (both commercial and under development) and interviewed some blind people in order to better understand the features that could and should be included in the cane.

Given that the development of this technology had been started earlier in a previous project, and will continue in the future, we built a test platform to measure and record the delay of the system in detecting gaps. The core of the work was to develop an algorithm able to process the ultrasonic echos from the ground received by the cane, and from these, detect the presence of steps and holes quickly and reliably. Tests conducted with the test platform showed reduced delay times, enabling the implementation of the algorithm on the cane.

We built a prototype of the cane to allow the testing of the developed algorithm in real environments. Some blind people tried it and showed great enthusiasm, since it detected every single gap crossing their path with an acceptable delay.

Despite the good results, there still are some problems remaining. Thus, some suggestions are left to solve them in the future, so that one day this technology may help the blind in their life.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	v
Lista de Acrónimos	ix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objectivos	2
1.4 Organização da dissertação	2
2 Sistemas electrónicos de apoio à mobilidade de cegos	5
2.1 Produtos similares em desenvolvimento	5
2.1.1 BrainPort Vision (tecnologia baseada numa câmara digital)	5
2.1.2 Detector de obstáculos (tecnologia baseada em infra-vermelhos)	6
2.1.3 Bengala de apoio a cegos 2008 (tecnologia baseada em ultra-sons)	7
2.1.4 FlashSonar	9
2.2 Medição de distâncias com ultra-sons	9
3 Manipulação da bengala branca	11
3.1 O Movimento da Bengala	11
3.1.1 Ensaios	11
3.1.2 Simulações em Matlab	14
3.2 Protótipo para reduzir o espaço invisível à bengala branca	15
3.3 Outras ideias	16
4 Sistema de Testes	19
4.1 Mecanismo desenvolvido	19
4.2 Arquitectura do Sistema de Testes	20
4.2.1 Microcontrolador	20
4.2.2 Transdutores de ultra-sons	21
4.2.3 Buffers, Amplificação de sinal e Detector de envolvente	21
4.2.4 Comunicação μ C-PC	23
4.2.5 Alimentação	23

4.2.6	Servo Motor	24
4.2.7	Sensor óptico	25
4.3	Criação de um banco de dados	30
4.3.1	Registo dos instantes de ocorrência de desníveis	30
4.3.2	Diferentes tipos de superfície	31
4.3.3	Aquisição de dados	31
4.3.4	Análise de resultados da plataforma de testes	37
5	Detecção rápida e robusta de desníveis	39
5.1	Detecção de desníveis (versão 2008)	39
5.1.1	Descrição do algoritmo	39
5.1.2	Problemas inerentes ao algoritmo	41
5.2	Desenvolvimento do novo algoritmo	41
5.2.1	Como contornar as falhas de eco/Detecção de buracos profundos	42
5.2.2	Detecção de degraus	45
5.2.3	O algoritmo completo	48
5.2.4	Problemas no algoritmo	50
5.3	Algoritmo 2009 vs. Algoritmo 2008	52
6	Novo protótipo da bengala	55
6.1	Hardware	55
6.1.1	Alimentação	56
6.1.2	Motor vibratório	56
6.1.3	LEDs para alerta de presença	57
6.1.4	Montagem mecânica	57
6.2	Software	58
6.3	Consumo da bengala	59
6.4	Testes no terreno	61
6.4.1	Desempenho em diversas superfícies	61
6.4.2	Apreciação dos cegos	61
7	Conclusões e trabalho futuro	63
7.1	Conclusões	63
7.2	Aspectos a melhorar	64
	Bibliografia	67
A	Outras tecnologias de apoio a cegos	69
B	Esquemas dos circuitos	71
C	PCBs	75
D	Acoplamento directo de sinal	79

Lista de Tabelas

3.1	Registo das medidas necessárias para o cálculo da velocidade de marcha. . . .	17
3.2	Registo das medidas necessárias para o cálculo de diversos parâmetros relacionados com o movimento da bengala branca.	18
3.3	Parâmetros calculados através dos ensaios.	18
4.1	Dados estatísticos dos sinais devolvidos pelo GP2D120.	28
4.2	Ilustração dos diferentes tipos de desníveis que se podem encontrar.	32
5.1	Registo das falhas de eco em diferentes superfícies ($f_{pulso} = 100Hz$).	45
5.2	Registo das falhas de eco em diferentes superfícies ($f_{pulso} = 150Hz$).	45
5.3	Derivadas da distância em diversas situações distintas ($f_{pulso} = 100Hz$). . . .	46
5.4	Derivadas da distância em diversas situações (usando os novos parâmetros). .	49
5.5	Comparação do atraso na detecção de desníveis por parte de ambas as versões do algoritmo.	53
6.1	Consumo do sistema em diversas situações.	60
A.1	Lista de sistemas electrónicos de apoio à mobilidade de cegos e suas principais características.	70

Lista de Figuras

2.1	BrainPort Vision (equipamento constituinte).	6
2.2	Esquema de funcionamento dos arrays de sensores Infra-Vermelhos.	7
2.3	Protótipo da bengala de apoio a cegos 2008.	8
3.1	Ilustração do movimento característico de uma bengala branca, deixando por sondar a maioria do espaço na frente do utilizador. A vermelho estão representados os parâmetros medidos e calculados a partir dos ensaios realizados. .	12
3.2	Decorrer de um dos ensaios realizados.	12
3.3	Trajecto descrito pela ponta da bengala, deixando muito espaço por sondar. .	14
3.4	Espaço invisível em função de v_x e v_{OSC}	14
3.5	Protótipo desenvolvido para testar as varetas transversais.	16
4.1	Plataforma de testes desenvolvida.	19
4.2	Diagrama de blocos da plataforma de testes.	20
4.3	Placa de desenvolvimento ez430-RF2500.	21
4.4	Configuração de buffers inversores utilizada para excitar o emissor de ultra-sons.	21
4.5	Circuito para amplificação, rectificação e detecção da envolvente do sinal proveniente dos receptores de ultra-sons.	22
4.6	O sinal recebido nos receptores nos 3 estágios distintos de acondicionamento. (a) Sinal recebido pelos receptores; (b) Sinal após rectificação e amplificação; (c) Envolvente do sinal em (b); (d) Sobreposição dos sinais em (b) e (c), observando-se claramente a perda de $500mV$ devido ao díodo presente no circuito.	23
4.7	Servo motor HS-422 e base giratória na qual está inserido.	24
4.8	Sensor óptico GP2D120.	25
4.9	Diagrama de blocos do sensor GP2D120.	25
4.10	Curva $V_o(L)$ característica do GP2D120.	26
4.11	Curva $V_o(L)$ do sensor GP2D120, obtida experimentalmente.	27
4.12	Tensão de saída lida na ADC (10 bits de quantificação com referência a $2.5V$). .	27
4.13	Histograma da aquisição realizada a $24cm$	28
4.14	Tempo de atraso do GP2D120 na medição de distâncias (retirado do datasheet do dispositivo).	29
4.15	Variação da tensão de saída em degraus ($f_a = 1kHz$).	29
4.16	Aquisições dinâmicas, mantendo uma distância de cerca de $12.5cm$ de uma superfície de calçada, primeiro à sombra (a) e de seguida ao sol (b).	30
4.17	Montagem usada para a simulação de uma superfície lisa	33

4.18	Sinais obtidos durante a aquisição sobre uma superfície lisa. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.	33
4.19	Material usado para a simulação de uma superfície irregular.	34
4.20	Sinais obtidos durante a aquisição sobre uma superfície irregular. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.	34
4.21	Montagem usada para a simulação de um degrau.	34
4.22	Sinais obtidos durante a aquisição a simular um degrau. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.	35
4.23	Montagem usada para a simulação de uma fissura.	35
4.24	Sinais obtidos durante a aquisição a simular uma fissura. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.	36
4.25	Montagem usada para a simulação de uma superfície com diversas fissuras.	36
4.26	Sinais obtidos durante a aquisição sobre uma superfície com diversas fissuras. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.	37
4.27	Montagem usada para a simulação de uma rampa.	37
4.28	Sinais obtidos durante a aquisição a simular uma rampa descendente. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.	38
4.29	Montagem usada para a simulação de um buraco profundo.	38
4.30	Sinais obtidos durante a aquisição a simular um buraco profundo. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.	38
5.1	Diagrama de blocos ilustrativo do tratamento dado às amostras de cada pulso recebido (versão 2008).	40
5.2	Sinal da Figura 4.20(a) após filtragem com $I(Z)$	40
5.3	Evolução do sinal filtrado aquando da passagem sobre um degrau.	42
5.4	Força do ruído típica em cada receptor.	43
5.5	Montagem para aquisição de dados na rua.	43
5.6	Falhas de eco consecutivas nos dois receptores durante a aquisição sobre calçada portuguesa.	44
5.7	Filtro FIR: (a) Resposta a um impulso unitário; (b) Resposta a um degrau unitário.	47
5.8	Diagrama de blocos ilustrativo do tratamento dado às amostras de cada pulso recebido (versão actual).	49
5.9	Exemplo ilustrativo de um pulso em que o segundo eco suplantou o primeiro.	50
5.10	Métodos distintos para determinar p . Em (a) é utilizada a posição do máximo absoluto e em (b) a do primeiro máximo relativo. Os círculos vermelhos marcam a posição determinada em cada pulso.	51
5.11	Histogramas da energia dos pulsos em superfícies distintas: (a) linóleo; (b) tijoleira; (c) calçada; (d) relva.	52
5.12	Histogramas da energia dos pulsos em função da distância ao solo.	53

6.1	Diagrama de blocos do hardware implementado na nova versão do protótipo da bengala.	55
6.2	Módulo de alimentação do novo protótipo.	56
6.3	Circuito para activação de LEDs de presença.	57
6.4	Protótipo da bengala desenvolvido para detecção de desníveis.	58
6.5	Fluxograma do algoritmo implementado na bengala.	59
6.6	Diagrama da montagem realizada para medir o consumo energético do sistema.	60
6.7	Decorrer dos testes de campo realizados por invisuais.	62
B.1	Esquema do circuito implementado na plataforma de testes.	72
B.2	Esquema do circuito implementado na bengala.	73
C.1	PCB implementado na plataforma de testes (vistas superior e inferior).	76
C.2	PCB implementado na bengala (vistas superior e inferior).	77
D.1	(a) Amostra de um pulso recebido afectado com acoplamento directo de sinal (b) aquisição de pulsos de ultra-sons ao longo do tempo sob o efeito de acoplamento directo.	79
D.2	Redução do acoplamento directo de sinal através de um tubo de papel a separar o emissor dos receptores.	80

Lista de Acrónimos

ADC	Analog to Digital Converter
CI	Circuito Integrado
DTC	Data Transfer Controller
FIR	Finite Impulse Response
IIR	Infinite Impulse Response
IV	Infra-Vermelho
LED	Light Emitting Diode
LPM	Low Power Mode
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PWM	Pulse-Width Modulation
SMD	Surface-Mount Device
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
uC	Micro Controlador

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Com o rápido avanço da tecnologia nas últimas décadas, têm vindo a ser desenvolvidos dispositivos capazes de auxiliar pessoas com deficiências, de maneira a que estas possam levar uma vida o mais normal possível, ultrapassando as suas dificuldades.

As pessoas invisuais possuem uma deficiência bastante complicada, principalmente em termos de locomoção, sendo por isso que grande percentagem delas é desempregada, diminuindo as suas condições e autonomia de vida. Os cegos são portanto, um dos públicos-alvo no desenvolvimento de novos dispositivos tecnológicos. No entanto, apesar de todos os avanços alcançados, a bengala branca (introduzida no final da década de 40) continua a ser o instrumento de eleição na locomoção dos cegos. Esta reúne uma série de factores que a mantêm como primeira escolha em relação a dispositivos tecnológicos presentes no mercado, tais como o seu baixo custo, leveza e portabilidade, fácil utilização e uma razoável sondagem do espaço e superfície na frente do transeunte.

As razões mais prováveis da falta de sucesso da maioria das tecnologias prendem-se com a limitação da informação que estas disponibilizam (nem sempre é a mais indicada/útil para o utilizador), com o seu elevado custo (para o baixo orçamento da maioria do público-alvo), necessidade de uma grande adaptação ao dispositivo em si, falta de discrição, baixo desempenho (as melhorias não são suficientemente significativas para substituírem a velha bengala) ou até mesmo falta de testes de desempenho (que demonstrem a eficiência do produto)[10].

Enquanto não aparece nenhum produto revolucionário no mercado, a maioria dos cegos continua a sua vida lutando contra as inúmeras dificuldades que lhes surgem.

1.2 Motivação

Portugal é um país no qual a maioria dos cegos constitui um grupo bastante desfavorecido. As associações não têm muito dinheiro, há pouca oferta de trabalho para estes indivíduos, as vias públicas em geral não estão preparadas para facilitar a sua mobilidade, apresentando muitas “armadilhas” que vão provocando inevitavelmente injúrias físicas.

Como não existe nenhum produto no mercado, que se encaixe no orçamento dos cegos, capaz de substituir eficazmente a bengala branca, o aluno Nuno Dias, do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, iniciou no ano lectivo de 2007/2008 o desenvolvimento de uma bengala electrónica capaz de suplementar a utilidade

de uma bengala branca normal.

Foi construído um protótipo que fazia frente a alguns dos principais problemas dos cegos, nomeadamente detecção de desníveis e buracos no chão e sinalização luminosa automática de presença em espaços escuros, tornando assim os cegos mais visíveis para os condutores. Apesar de o protótipo ter demonstrado resultados satisfatórios, ainda existe um longo caminho a percorrer para torná-lo num produto comercial. Este projecto pretende portanto, aproximar um pouco mais o produto das lojas.

1.3 Objectivos

Tendo sido este um projecto já iniciado no ano lectivo de 2007/2008, os objectivos para este ano prendem-se principalmente com o melhoramento da detecção de desníveis na superfície, de forma a tornar o sistema mais robusto e rápido. Pretende-se também estudar uma alternativa aos sensores de ultra-sons (usados na versão anterior) como forma de detecção de desníveis, nomeadamente a utilização de sensores ópticos de Infra-Vermelhos (IV).

Como no produto desenvolvido anteriormente não foi avaliada a resposta, em termos de rapidez, na detecção de desníveis, pretende-se desenvolver um sistema capaz de o fazer para a nova versão.

Na busca dos objectivos descritos, nunca deverão ser negligenciados dois factores muito importantes: baixo consumo energético (elevada autonomia do dispositivo) e baixo custo.

1.4 Organização da dissertação

Este documento é constituído por 7 capítulos, cada qual dividido em secções e estas, por sua vez, em subsecções. Em cada capítulo serão abordados os seguintes temas:

- Capítulo 1, “Introdução”: breve introdução ao trabalho com o intuito de enquadrar o leitor no tema em causa e definir os objectivos da tese;
- Capítulo 2, “Sistemas electrónicos de apoio à mobilidade de cegos”: enumeração e descrição de alguns dispositivos concorrentes, cada qual baseado numa tecnologia distinta. É apresentado também o princípio físico no qual a bengala de apoio a cegos se baseia para detectar desníveis no solo;
- Capítulo 3, “Manipulação da bengala branca”: neste capítulo são apresentados os resultados de alguns ensaios realizados com um cego, de maneira a perceber quais os problemas que os cegos enfrentam e a forma como estes se deslocam e movimentam a bengala branca. Desta forma tornou-se possível adaptar o sistema desenvolvido às necessidades dos cegos;
- Capítulo 4, “Sistema de testes”: aqui é apresentada a construção da plataforma de testes, utilizada posteriormente para quantificar o atraso na detecção de desníveis. São também apresentados os resultados dos testes realizados com o sensor óptico de forma a perceber as vantagens e desvantagens deste em relação aos sensores de ultra-sons. No final do capítulo encontram-se representados os sinais adquiridos sobre diversos tipos de superfícies e desníveis;

- Capítulo 5, “Detecção rápida e robusta de desníveis”: descrição do algoritmo de detecção de desníveis desenvolvido em 2008 e desenvolvimento da nova versão do algoritmo. São apresentados os resultados obtidos com a plataforma de testes para ambas as versões do algoritmo, demonstrando claramente a evolução conseguida;
- Capítulo 6, “Novo protótipo da bengala”: construção de um novo protótipo com o novo algoritmo implementado para realizar testes de campo. Resultados e opiniões obtidas durante os testes realizados com alguns cegos.
- Capítulo 7, “Conclusões e trabalho futuro”: aqui são tecidas as conclusões que se tiraram dos resultados obtidos ao longo do trabalho. São dadas algumas sugestões de aspectos que deverão ser melhorados no futuro, tendo em conta os problemas que foram sendo encontrados ao longo do desenvolvimento da bengala.

Capítulo 2

Sistemas electrónicos de apoio à mobilidade de cegos

Neste capítulo vão ser apresentadas algumas tecnologias que têm vindo a ser desenvolvidas para auxiliar os cegos na sua mobilidade. No Apêndice A é possível encontrar uma tabela extensa com as principais características de outros produtos, os quais foram abordados com mais detalhe em [8]. Será também abordado o conceito de “FlashSonar” [3], uma capacidade impressionante desenvolvida por alguns cegos. Como o produto a ser desenvolvido no âmbito deste projecto é baseado maioritariamente em ondas ultra-sónicas, será feita uma breve descrição sobre o método de medição de distâncias com ultra-sons.

2.1 Produtos similares em desenvolvimento

Até hoje foram desenvolvidos vários sistemas electrónicos para auxiliar pessoas invisuais, sendo que a maior parte é baseada na transmissão de uma onda de energia e recepção do seu eco (normalmente ultra-sons ou IV) ou então em câmaras digitais. Em seguida, será dado um exemplo para cada um dos três métodos, apontando algumas vantagens e desvantagens inerentes a cada produto.

2.1.1 BrainPort Vision (tecnologia baseada numa câmara digital)

Website oficial: <http://vision.wicab.com/> [1]

Este dispositivo, ainda em desenvolvimento pela Wicab, usa uma câmara de vídeo digital presa a um par de óculos para capturar imagens, um pequeno computador portátil para controlo e processamento digital de imagem e uma matriz de eléctrodos 20x20 para ser colocada na língua (Figura 2.1).

As imagens capturadas na câmara são transmitidas em tempo real para a língua em forma de pequenos choques eléctricos, cuja intensidade é proporcional à intensidade de branco, formando uma imagem tátil do espaço em frente do utilizador. O BrainPort Vision possui ainda um comando para regular o zoom da câmara, intensidade do sinal recebido na língua e inverter o contraste da imagem recebida.

Este sistema não pretende substituir a bengala branca, mas sim complementá-la, melhorando a mobilidade, segurança e qualidade de vida dos utilizadores. Passar por entre uma

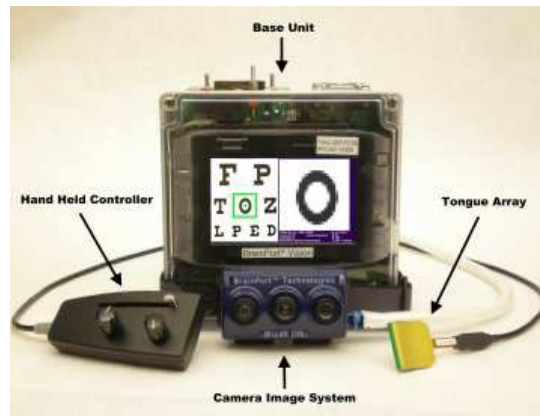


Figura 2.1: BrainPort Vision (equipamento constituinte).

porta, pegar numa cafeteira quente directamente pela asa, encontrar um lugar livre num autocarro público, identificar sinais de trânsito, são alguns exemplos de tarefas que ficam bastante simplificadas com o uso do BrainPort.

Vantagens:

- Possibilita a identificação da forma, tamanho e direcção dos objectos, bem como de desenhos e letras/algarismos;
- A informação é recebida de uma forma bastante intuitiva, não sendo necessário decodificar códigos;
- O controlo de zoom permite aumentar a resolução em zonas de interesse específico.

Desvantagens:

- Não dispensa o uso de uma bengala ou de um cão guia;
- Não foi concebido para detectar desníveis no solo (depende do contraste entre as superfícies);
- É necessário treinar para conseguir interpretar as imagens tácteis eficazmente;
- O protótipo ainda é muito caro e volumoso para comercializar.

2.1.2 Detector de obstáculos (tecnologia baseada em infra-vermelhos)

Esta é uma tecnologia ainda em desenvolvimento na Universidade de Catânia, Itália e ainda não lhe foi atribuído um nome específico.

O seu principal objectivo consiste em detectar obstáculos na frente do indivíduo (cobrindo toda a altura deste), devolvendo informação acerca da distância aproximada a que estes se encontram. Utiliza um array de 3 emissores de IV e outro de 3 receptores para realizar a detecção, tal como está demonstrado na Figura 2.2. Os sinais são emitidos em três direcções diferentes e, dependendo da posição em que o obstáculo se encontra (identificado pelos círculos amarelos na Figura 2.2), vão reflectir num determinado ângulo de forma a serem captados

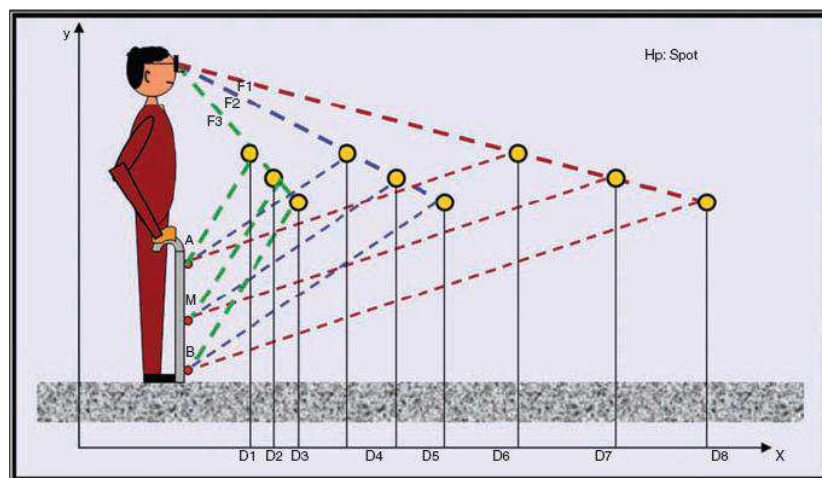


Figura 2.2: Esquema de funcionamento dos arrays de sensores Infra-Vermelhos.

maioritariamente por um dos receptores. Estes dados não conseguem indicar com precisão qual a distância específica a que o obstáculo se encontra (devido principalmente a irregularidades no obstáculo que alterem a direcção do sinal reflectido). Em vez disso, a gama de alcance é seccionada, sendo apenas indicada em qual das secções é que o obstáculo se encontra. Apesar desta limitação, a informação é suficiente para que os utilizadores possam deslocar-se em segurança.

As bruscas alterações nas condições de luminosidade e propriedades reflectoras dos materiais costumam representar um sério problema para os sensores de distância ópticos mais baratos. No entanto, o processamento de sinal utilizado neste dispositivo, juntamente com o facto de este apenas indicar a posição aproximada do obstáculo, torna-o praticamente imune aos problemas anteriores. Isto torna o produto mais fiável e mais barato, já que não necessita de usar sensores mais sofisticados [6].

Vantagens:

- Projectado para ter um baixo custo;
- Boa imunidade a ruído proveniente de condições externas;
- Detecta obstáculos a toda a altura e oferece um bom alcance.

Desvantagens:

- Não detecta desníveis na superfície;

2.1.3 Bengala de apoio a cegos 2008 (tecnologia baseada em ultra-sons)

A bengala de apoio a cegos desenvolvida em 2008 foi a primeira versão desta tecnologia. A sua principal função consiste em suplementar o uso de uma bengala branca normal, dotando-a com a capacidade de detectar desníveis na superfície, auxiliando os cegos na sua mobilidade. Para o efeito, utiliza transdutores de ultra-sons e alerta o utilizador por meio de vibração e/ou áudio.

8CAPÍTULO 2. SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE APOIO À MOBILIDADE DE CEGOS

Com o objectivo de aumentar a segurança dos seus utilizadores na via pública, a bengala está equipada com LEDs de alto brilho que piscam automaticamente em locais de pouca luminosidade, alertando os condutores mais distraídos.

Tanto o hardware como software deste dispositivo foram projectados de forma a diminuir o consumo energético, permitindo uma maior autonomia das pilhas. Com o mesmo intuito, possui ainda um painel de energia solar integrado que carrega as pilhas e alimenta todo o sistema quando na presença de luminosidade suficiente.

Na Figura 2.3 pode-se visualizar o aspecto final do protótipo construído em 2008.

Vantagens:

- Detecta desníveis no solo;
- Elevada autonomia;
- Baixo custo (cerca de 80€);
- Alerta de presença automático;
- Pode ser usado como uma bengala normal.

Desvantagens:

- Não detecta obstáculos acima da cintura;
- Protótipo pesado e pouco prático para experimentação;
- Algoritmo de detecção relativamente lento.

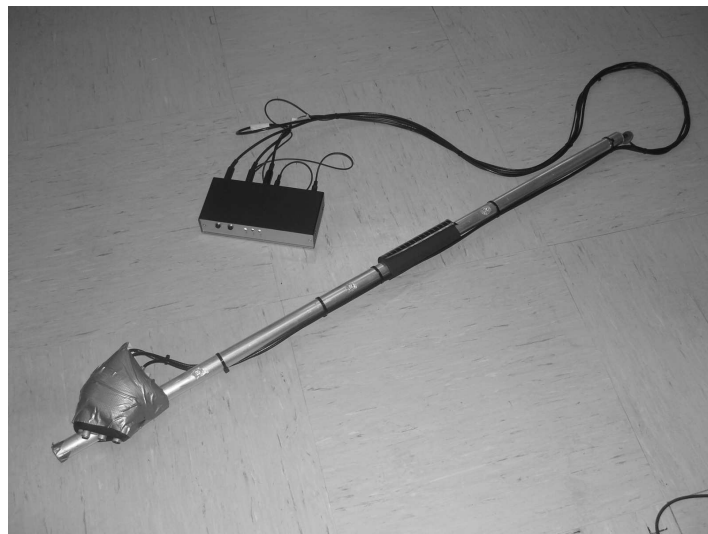


Figura 2.3: Protótipo da bengala de apoio a cegos 2008.

2.1.4 FlashSonar

A ecolocalização é uma capacidade utilizada por alguns animais, tais como os morcegos e os golfinhos e que foi imitada pelo homem para desenvolver os sonares. A ecolocalização consiste em enviar uma onda ultra-sónica que, ao reflectir em obstáculos pode fornecer informações acerca da posição, forma e velocidade de deslocação do mesmo, entre outras.

Apesar de na maioria dos casos serem usadas ondas ultra-sónicas, algumas pessoas, com muito treino, conseguiram desenvolver esta capacidade usando frequências audíveis para os humanos, através de estalidos agudos produzidos com a língua. Daniel Kish é um dos indivíduos que utiliza e ensina esta técnica e apelidou-a de FlashSonar, pois o seu efeito é semelhante ao do flash de uma máquina fotográfica quando acende numa sala escura, dando uma amostragem do espaço no preciso instante em que dispara.

FlashSonar não é, portanto, uma tecnologia, mas sim um conceito associado à capacidade de ecolocalização. No entanto, esta pode ser facilitada através de dispositivos electrónicos e estes têm vindo a ser alvo de pesquisa e desenvolvimento. Apesar de ainda haver pouca informação acerca do assunto, já foram realizados alguns testes que demonstraram que um dispositivo que emita um estalido alto e curto, pode mesmo triplicar o efeito do FlashSonar em relação ao estalido da língua. No entanto, para tornar um dispositivo desta natureza o mais eficiente possível, é necessário estudar que tipo de som e frequência devem ser usados.

Tal como foi especificado para os produtos referenciados anteriormente, serão também aqui expostas algumas vantagens e desvantagens inerentes ao uso desta técnica.

Vantagens:

- Detecta objectos em qualquer posição relativa ao utilizador;
- Reconhece a posição, forma e natureza dos objectos;
- Pode detectar objectos grandes (como edifícios) a centenas de metros de distância;
- Se a técnica for suficientemente dominada, o utilizador pode deslocar-se sem mais nenhum auxílio.

Desvantagens:

- Técnica muito difícil de dominar;
- Ainda não é conhecida a melhor maneira de adaptar tecnologicamente.

2.2 Medição de distâncias com ultra-sons

Os ultra-sons consistem em ondas de pressão sonoras com frequência superior a 20kHz (limite máximo audível pelos humanos). A velocidade a que as ondas se propagam é proporcional à raiz quadrada da razão entre a elasticidade e densidade do material que atravessam, bem como da temperatura ambiente. Para o âmbito deste projecto, o meio de propagação é sempre o ar, no qual a velocidade do som, com temperatura ambiente de 25°C, é 344m/s. Qualquer material que não o ar (sólido, líquido ou gasoso) reflecte, absorve e transmite parte da onda incidente. A porção reflectida é chamada de eco e é a partir desta que se pode medir a distância a que um objecto se encontra.

Recorrendo a transdutores piezoeléctricos cuja frequência de ressonância se encontre na gama dos ultra-sons, é possível emitir e receber ondas desta natureza. Ao emitir uma onda ultra-sónica na direcção de um objecto, é recebido um eco. Para saber a distância a que o objecto se encontra do transdutor, basta medir o tempo que decorre entre o envio da onda e a chegada do seu eco (tempo de voo) e realizar o seguinte cálculo:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

em que v é velocidade de propagação, t é o tempo de voo e d a distância a que o objecto se encontra.

Todo este processo realiza-se com relativa facilidade recorrendo a um microcontrolador. Este é capaz de excitar o transdutor piezoeléctrico com a frequência necessária, adquirir o eco recebido e efectuar os cálculos necessários para a determinação da distância.

Existem, no entanto, algumas dificuldades inerentes a este método. A quantidade de energia reflectida nos objectos depende das suas dimensões e composição, bem como da forma e orientação da superfície reflectora. A quantidade de energia perdida na reflexão, aliada à atenuação natural da onda no ar, pode provocar o desaparecimento completo do eco. Superfícies irregulares podem provocar a reflexão de vários ecos que, devido a interferências destrutivas, se podem cancelar mutuamente no receptor. O posicionamento de um receptor extra ligeiramente deslocado do anterior pode ajudar a mitigar este problema, criando maior diversidade espacial [5][9].

Capítulo 3

Manipulação da bengala branca

No desenvolvimento de um produto, o engenheiro deve ter em atenção as necessidades do utilizador. Para construir um produto que seja capaz de satisfazer as necessidades dos cegos, é necessário saber directamente destes quais são, em concreto, essas mesmas necessidades. É também essencial aprender a maneira como estes se deslocam e utilizam as suas bengalas no dia-a-dia. Para esse efeito, pedimos a um cego que se deslocasse ao Departamento de Electrónica da Universidade de Aveiro para termos uma conversa sobre esses tópicos, realizarmos alguns ensaios de teste com ele e confrontá-lo com algumas ideias inovadoras.

3.1 O Movimento da Bengala

A velocidade de marcha e movimento da bengala variam de cego para cego, no entanto, uma das formas mais comuns de a movimentar é a técnica conhecida pelos “dois toques”. Esta consiste em descrever um arco à frente do corpo, cobrindo aproximadamente a largura dos ombros e batendo com a ponta da bengala no chão apenas nos limites da oscilação. O lado em que a bengala toca no chão deve ser o contrário do pé que está à frente, de forma a que se coloque sempre o pé na posição em que se bateu previamente com a ponta da bengala. Desta forma, o cego é capaz de detectar objectos que se encontrem na sua frente, bem como desníveis no piso. Para além disso, a oscilação da bengala também tem o propósito de direccionar o cego, de maneira a que este caminhe em linha recta. Para isso, a bengala deve ir batendo em algo que o guie, como uma parede ou no lancil de um passeio. Outra forma de movimentar a bengala consiste em realizar o mesmo arco, mas deslizando a ponta no chão para ter uma melhor percepção dos desníveis.

Independentemente da técnica usada, a bengala branca usada pelos cegos é capaz de amostrar apenas uma pequena porção do espaço. Na Figura 3.1 está ilustrado o movimento em arco característico de uma bengala branca e, como se pode observar, este deixa muito espaço por sondar na frente do cego. Nesse espaço podem-se encontrar pequenos obstáculos ou buracos, capazes de provocar graves acidentes.

3.1.1 Ensaios

De forma a poder caracterizar fielmente a marcha dos cegos e quais as falhas na amostragem do espaço que estes realizam com a sua bengala, realizaram-se algumas experiências. Preparou-se um pequeno percurso em linha recta, com cerca de 8 metros de comprimento,

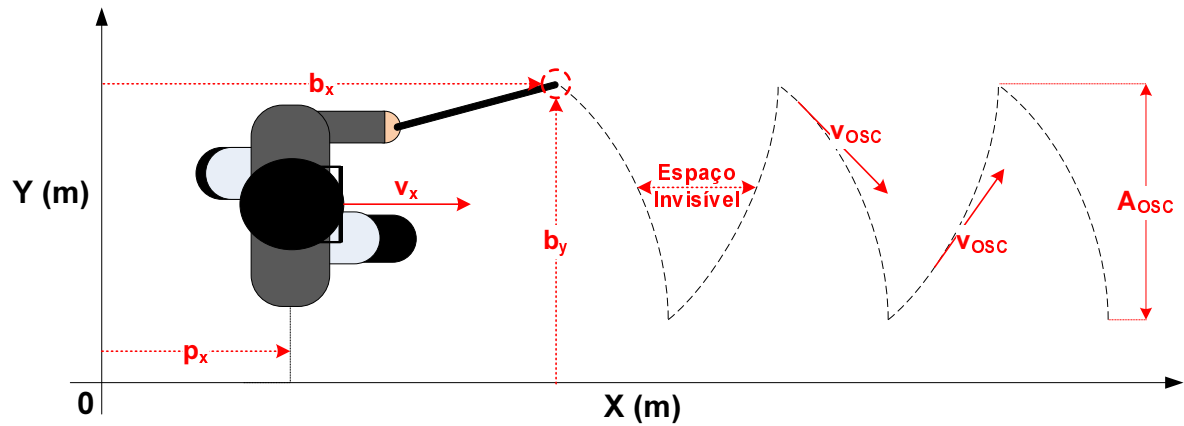


Figura 3.1: Ilustração do movimento característico de uma bengala branca, deixando por son-
dar a maioria do espaço na frente do utilizador. A vermelho estão representados os parâmetros
medidos e calculados a partir dos ensaios realizados.

marcado no chão para identificar facilmente as distâncias (Figura 3.2). Neste, o cego realizou
quatro ensaios enquanto era filmado, para posteriormente medir e calcular alguns parâmetros
importantes.



Figura 3.2: Decorrer de um dos ensaios realizados.

Após a realização dos ensaios, analisaram-se as filmagens num programa de visualização

de vídeo [2], frame a frame. Desta forma foi possível registar com precisão todos os dados necessários para o cálculo dos parâmetros desejados. Na Tabela 3.1 estão apresentados os dados adquiridos, necessários para o cálculo da velocidade de marcha, v_x . Tendo sido as filmagens realizadas a 25fps, tem-se que:

$$v_x = \frac{p_x \text{ final} - p_x \text{ inicial}}{\frac{\text{frame final} - \text{frame inicial}}{25}} \quad (3.1)$$

em que p_x representa a posição do cego no eixo X (Figura 3.1).

Na Tabela 3.3 é possível observar a velocidade de marcha calculada para cada um dos 4 ensaios. No primeiro e segundo ensaio a velocidade de marcha foi mais lenta ($\approx 0.91m/s$ e $\approx 1.05m/s$, respectivamente), pois o invisual ainda não estava ambientado ao espaço. No entanto, explicou que a sua velocidade habitual num passeio era bastante maior, exemplificando-a no terceiro e quarto ensaio que, como se pode observar, não é inferior à de uma pessoa normal ($\approx 1.45m/s$ e $\approx 1.47m/s$, respectivamente).

Quanto aos parâmetros referentes ao movimento da bengala, adquiriram-se os valores apresentados na Tabela 3.2. As medições de b_x e b_y referem-se à posição da ponta da bengala aquando do toque no chão, tal como se encontra representado na Figura 3.1. Com estas medidas foi possível calcular a amplitude e velocidade de oscilação da bengala (A_{OSC} e v_{OSC} , respectivamente), bem como o espaço invisível para a mesma (Tabela 3.3).

A velocidade de oscilação usa o utilizador como referência e consiste na velocidade média, tangencial ao arco descrito pela bengala. Como o comprimento do arco descrito pela bengala é dado por:

$$a = 2 \cdot r \cdot \arcsin(A_{OSC}/2) \quad (3.2)$$

e se mediu que r (raio de rotação da bengala) é aproximadamente $1m$, tem-se que:

$$v_{OSC} = \frac{2 \cdot \arcsin(A_{OSC}/2) \cdot (n^\circ \text{ de toques} - 1)}{\frac{\text{frame final} - \text{frame inicial}}{25}} \quad (3.3)$$

sendo que $n^\circ \text{ de toques}$ representa o número de vezes que a bengala toca no chão, em ambos os lados.

Através dos resultados obtidos, chegou-se a uma conclusão importante, existe uma razão aproximadamente constante entre v_x e v_{OSC} , tal como se observa pela Tabela 3.3. Isto deve-se ao facto de o ritmo da bengala ter que acompanhar o ritmo da passada, de forma a estar sempre no lado contrário ao do pé dianteiro. Quanto à amplitude de oscilação, verificou-se que existe uma maior tendência a alargar mais o movimento com o aumento da velocidade de marcha o que, como se vai poder verificar, prejudica bastante o espaço invisível.

Neste caso, e apenas para efeitos de quantificação, considera-se que o espaço invisível é a distância que vai desde o ponto em que a ponta da bengala passa à frente do utilizador até à passagem seguinte, no sentido contrário (ilustrado na Figura 3.1). Assumindo que v_{OSC} é constante ao longo de todo o trajecto, tem-se que:

$$\text{Espaço Invisível} = \frac{b_x \text{ final} - b_x \text{ inicial}}{n^\circ \text{ de toques} - 1} \quad (3.4)$$

Este parâmetro só foi calculado para o primeiro e terceiro ensaio pois nestes foi realizada uma filmagem adicional com uma câmara de lado, a acompanhar o deslocamento do cego, facilitando a medida de b_x .

3.1.2 Simulações em Matlab

Desenvolveu-se uma rotina em Matlab capaz de representar os pontos percorridos pela ponta da bengala no plano do chão, de forma a observar claramente quais as zonas invisíveis a esta. Na Figura 3.3 está demonstrado um exemplo simulado pela rotina, em que $v_x = 1.47m/s$, $v_{OSC} = 1.58m/s$ e $A_{OSC} = 65cm$ e na Figura 3.4 está representado num gráfico 3D a variação do espaço invisível em função de v_x e v_{OSC} . Depois dos resultados obtidos com os

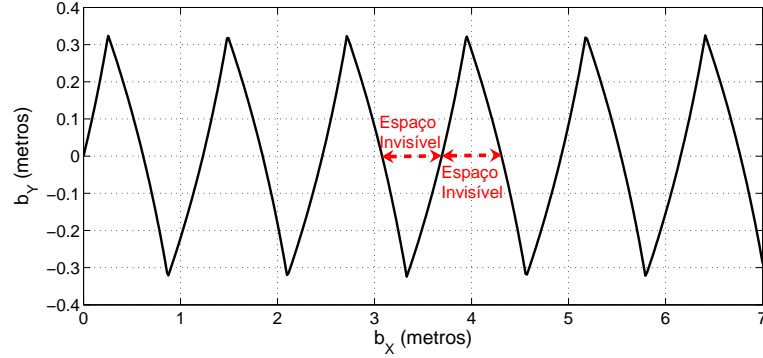


Figura 3.3: Trajecto descrito pela ponta da bengala, deixando muito espaço por sondar.

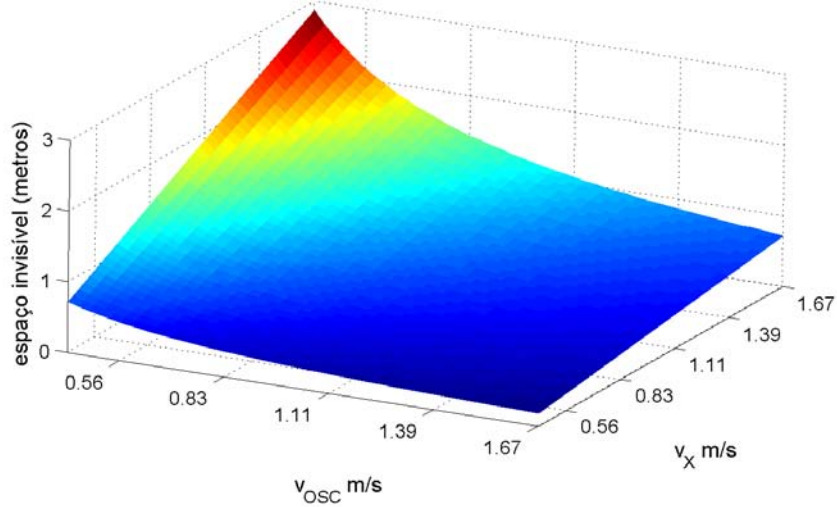


Figura 3.4: Espaço invisível em função de v_x e v_{OSC} .

ensaios filmados, foi possível inserir parâmetros realistas na rotina e comparar os resultados da simulação com os experimentais de forma a testar a exactidão dos primeiros.

Usando então os parâmetros v_x , v_{OSC} e A_{OSC} para o primeiro e terceiro ensaio, verifica-se que o valor obtido para o espaço invisível é muito próximo do experimental (Tabela 3.3). Apesar de na realidade o movimento da bengala não ser constante nem simétrico (como a bengala vai na mão direita, o eixo de rotação desta não está centrado com o corpo), estes valores validam o uso desta rotina, oferecendo uma boa aproximação da realidade.

Como se pode observar na Tabela 3.3, o espaço invisível nos ensaios 3 e 4 é consideravelmente maior que nos ensaios 1 e 2. Como os parâmetros que variaram bruscamente

do primeiro par de ensaios para o segundo foram v_x (e consequentemente v_{OSC}) e A_{OSC} , simularam-se duas experiências:

1ª experiência - mantendo a amplitude de oscilação constante, igual a $70cm$, variou-se a velocidade de marcha entre $0.4m/s$ a $1.7m/s$, mantendo uma razão v_x/v_{OSC} constante, igual a 0.95 ;

2ª experiência - mantendo uma velocidade de marcha constante, igual a $1.4m/s$, e v_x/v_{OSC} igual a 0.95 , variou-se a amplitude de oscilação desde $40cm$ até $100cm$.

Na 1ª experiência, o espaço invisível manteve-se aproximadamente constante, tendo sido o valor máximo $69.3cm$ com uma discrepância para o valor mínimo de $1.3cm$. Já na 2ª experiência, o espaço invisível máximo foi $100cm$, havendo uma discrepância para o valor mínimo de $61cm$. Como já foi visto que os cegos mantêm uma razão v_x/v_{OSC} aproximadamente constante, estes resultados mostram claramente que a amplitude de oscilação deve ser mantida o mais reduzida possível.

3.2 Protótipo para reduzir o espaço invisível à bengala branca

Para se conseguir reduzir a amplitude de oscilação da bengala sem prejudicar a largura abrangida por esta, surgiu a ideia de colocar varetas transversais à bengala na ponta da mesma. Para além de reduzir a amplitude de oscilação, que por si só já diminui o espaço invisível, as varetas aumentam o leque de superfície varrida, aumentando muito a área amostrada pela bengala. Estas varetas, inspiradas nos bigodes dos gatos, servirão como extensões laterais da bengala, tocando em eventuais obstáculos que apareçam deslocados lateralmente no caminho do cego, sem ser necessário que este desvie a bengala da sua frente. Graças a estes “bigodes”, também é possível ir tacteando a referência lateral para caminhar em linha recta.

Para testar a ideia, construiu-se um protótipo simples (Figura 3.5) para o cego poder experimentar e criticar. Usaram-se varetas em fibra de carbono, permitindo uma conjugação de flexibilidade e resistência. Após ter experimentado o protótipo durante uma semana, o cego exprimiu o seu desagrado em relação às varetas, apontando bastantes críticas:

- Devido ao seu exagerado comprimento, têm pouca firmeza nas extremidades, oferecendo pouca sensibilidade ao utilizador na detecção de obstáculos;
- Prendem-se com bastante frequência em obstáculos, tais como jantes de carros e vegetação, não sendo sempre trivial para um cego desprendê-las;
- Em locais com muita gente, nomeadamente transportes públicos em horas de ponta, as varetas incomodam as pessoas e podem levá-las a tropeçar;
- Em corredores estreitos, tais como os de minimercados, as varetas tornam-se um empecilho e provocam a queda de produtos das prateleiras;
- Devido à disposição em que as varetas foram colocadas, não detectam pequenos obstáculos laterais, tais como os lancis dos passeios;

- A falta de uma ponta apropriada para bengalas para cegos faz com que este protótipo encrave facilmente em superfícies irregulares.

Apesar da opinião negativa, não nos deixámos desencorajar e surgiram algumas ideias para mitigar os problemas apresentados:

- Reduzir o tamanho das varetas de forma a apresentarem firmeza suficiente ao longo de todo o comprimento, facilitando ainda a sua utilização em espaços apertados;
- As varetas deverão ser fáceis de recolher para permitir o uso da bengala em locais mais povoados;
- A disposição das varetas deve ser paralela ao chão e rente ao mesmo de forma a servir o propósito desejado;
- A introdução de uma ponta redonda e rotativa na extremidade da bengala facilitará o seu uso e assemelhar-se-á mais com a bengala branca comum;
- Devem ser usados materiais leves na concepção dos protótipos, já que o peso pode dificultar a sua experimentação.



Figura 3.5: Protótipo desenvolvido para testar as varetas transversais.

3.3 Outras ideias

Após os ensaios realizados, tivemos oportunidade de falar um pouco com o cego para esclarecer algumas dúvidas e retirar algumas ideias. Este transmitiu-nos ao longo de toda a conversa que os invisuais podem ser muito distintos em termos de autonomia. Há aqueles que são mais dependentes de terceiros, que têm dificuldade em levar uma vida normal e há os que não se deixam limitar pelo seu problema, realizando todo o tipo de tarefas e que preferem não dar parte fraca. Muitos dos mais autónomos não gostam de se “denunciar” enquanto cegos, preferindo passar o mais despercebido possível. O cego que nos visitou, enquadrando-se nesse perfil, explicou que, para além das varetas transversais, também não gostou muito da ideia

dos LEDs para alerta de presença no escuro (já implementados no protótipo desenvolvido em 2008). Sendo assim, para manter a versão final da bengala o mais versátil possível, este tipo de complementos deverá ser passível de desactivação/remoção.

Em baixo estão descritas algumas ideias dadas e/ou aprovadas pelo cego:

- Equipar a bengala com um emissor de pulsos agudos audíveis para auxiliar na ecolocalização;
- Transmitir ao utilizador informação sobre a intensidade luminosa. Esta informação poderá fornecer referências geográficas ao utilizador (ex: passagem de ambientes indoor para outdoor e vice-versa) ou indicar se a sua casa está iluminada ou escura (especialmente quando recebem visitas);
- O comprimento da bengala deverá ser ajustável, já que o comprimento ideal corresponde à distância que vai desde o chão até ao início do esterno (variável de indivíduo para indivíduo). Uma estrutura telescópica serviria para o efeito e permitiria um fácil arrumo. Será no entanto necessário encontrar uma maneira eficiente de acondicionar o hardware numa estrutura destas;
- Dotar um boné com sensores ultra-sónicos para detectar obstáculos à altura da cabeça. Esta seria uma forma simples e discreta de evitar estes obstáculos tão perigosos.

Ensaio	p_x (m)	Frame
1	2	72
	7	210
2	2	313
	7	432
3	2	538
	7	624
4	2	713
	7	798

Tabela 3.1: Registo das medidas necessárias para o cálculo da velocidade de marcha.

Ensaio	b_x (m)	b_y (m)	Lado	Frame
1	2.1	0.27	Direito	49
	2.5	0.91	Esquerdo	66
	3.4	0.37	Direito	80
	3.8	1.07	Esquerdo	97
	4.7	0.5	Direito	114
	5.2	1.18	Esquerdo	130
	6	0.65	Direito	146
	6.4	1.32	Esquerdo	163
	7	0.66	Direito	179
2	-	0	Direito	316
	-	0.63	Esquerdo	330
	-	0	Direito	344
	-	0.72	Esquerdo	360
	-	-0.09	Direito	374
	-	0.70	Esquerdo	390
	-	-0.13	Direito	405
	-	0.5	Esquerdo	421
3	2.5	-0.06	Direito	543
	3.5	0.74	Esquerdo	557
	4.3	-0.14	Direito	570
	5.2	0.74	Esquerdo	584
	5.8	-0.12	Direito	597
	6.8	0.81	Esquerdo	613
4	-	0	Direito	695
	-	0.78	Esquerdo	709
	-	-0.10	Direito	722
	-	0.66	Esquerdo	735
	-	-0.22	Direito	749
	-	0.77	Esquerdo	762
	-	0.04	Direito	776
	-	0.94	Esquerdo	789

Tabela 3.2: Registo das medidas necessárias para o cálculo de diversos parâmetros relacionados com o movimento da bengala branca.

Ensaio	v_x (m/s)	v_{OSC} (m/s)	v_x/v_{OSC}	$A_{OSC}(cm)$	Espaço invisível medido (cm)	Espaço invisível simulado (cm)
1	0.91	1.02	0.89	65	61	59
2	1.05	1.10	0.95	65	-	64
3	1.45	1.56	0.93	85	86	83
4	1.47	1.63	0.90	85	-	79

Tabela 3.3: Parâmetros calculados através dos ensaios.

Capítulo 4

Sistema de Testes

4.1 Mecanismo desenvolvido

Como já foi referido anteriormente, o projecto pecava por não ter um sistema de testes eficiente, capaz de determinar parâmetros importantes, tais como o atraso associado à detecção de desníveis e a probabilidade de erro, entre outros. A qualidade do algoritmo de detecção de desníveis era, portanto, realizada heurísticamente. Para colmatar essa falta, foi necessário projectar e desenvolver um sistema capaz de fornecer esses dados com precisão.

Construiu-se então o mecanismo apresentado na Figura 4.1. Este possui uma base quadrada para suportar pisos simulados, uma base giratória controlada por um servo motor e uma haste presa à base com os sensores na extremidade. Este sistema permite simular o movimento de uma bengala sobre o solo.



Figura 4.1: Plataforma de testes desenvolvida.

Para controlar todo o mecanismo, foi desenvolvido um PCB, cujo circuito tem por base o desenvolvido em [8]. Foram no entanto acrescentados dois receptores de ultra-sons, um sensor de distâncias óptico de infra-vermelhos e o controlo do servo motor. O diagrama de blocos da plataforma de testes pode ser visualizado na Figura 4.2 e será explicado mais pormenorizadamente na secção 4.2. Para ver detalhadamente o esquema do circuito e o layout do PCB deve consultar os Apêndices B e C, respectivamente.

Com os dois receptores extra pretende-se verificar se o acrescento de mais sensores melhora a qualidade do sinal recebido, detectando ecos quando outros não o conseguem. Os LEDs servem apenas para efeitos de debug e os botões para controlo do estado do sistema.

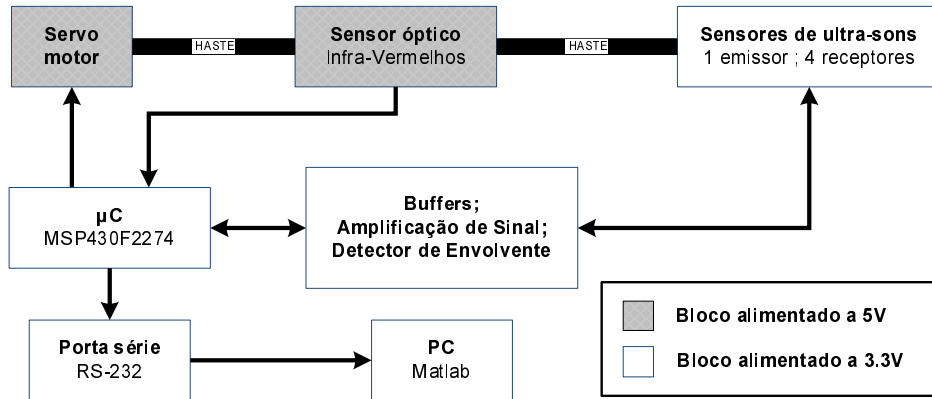


Figura 4.2: Diagrama de blocos da plataforma de testes.

Devido à quantidade e diversidade de dispositivos inseridos no mesmo PCB, o controlo de ruído no mesmo foi um desafio, devido nomeadamente ao servo motor e ao sensor óptico. Estes possuem picos de corrente elevados, perturbando principalmente os sinais recebidos pelos receptores de ultra-sons, que são da ordem das dezenas de milivolt. Para ultrapassar tal dificuldade, foram aplicadas diversas técnicas de redução de ruído [11], permitindo um desempenho fiável do circuito, não tendo sido necessário desperdiçar tempo extra a descortinar bugs de hardware.

4.2 Arquitectura do Sistema de Testes

O funcionamento da plataforma de testes construída centra-se no μC , responsável pelo controlo da mesma. Durante o decorrer dos testes o μC controla a posição do servo motor, movendo os sensores (óptico e ultra-sónicos) por cima das superfícies. Para o emissor de ultra-sons emitir os pulsos de som, é gerado um sinal no μC , que por sua vez é filtrado em buffers de forma a excitar o emissor. O eco recebido pelos quatro receptores de ultra-sons proveniente do pulso previamente emitido passa por um bloco de acondicionamento de sinal, sendo então capturado em quatro canais distintos da ADC do μC . Por cada pulso de ultra-sons emitido e, consequentemente, recebido, é também capturado noutra canal da ADC o sinal devolvido directamente pelo sensor óptico. Todas as amostras capturadas são então enviadas por RS-232 para a porta série do computador, onde serão guardadas e posteriormente processadas com o Matlab.

Em seguida será feita a descrição mais pormenorizada de cada um dos blocos constituintes da plataforma de testes.

4.2.1 Microcontrolador

O microcontrolador usado no sistema foi o MSP430F2274, inserido na placa de desenvolvimento ez430-RF2500, da Texas Instruments (Figura 4.3). Este modelo foi concebido para uso em sistemas de baixo consumo energético já que a sua tensão de operação pode variar desde

1.8V a 3.6V e possui cinco modos de operação low-power. Nestes, o consumo pode variar de $270\mu A$ (a $1MHz$, 2.2V) em modo activo até $0.1\mu A$ em modo off. Entre os diversos periféricos, encontram-se dois timers de 16bit e uma ADC de 10bit com tensão de referência ajustável e controlador de transferência de dados incorporado (DTC).

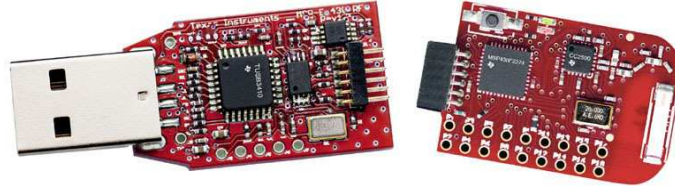


Figura 4.3: Placa de desenvolvimento ez430-RF2500.

Este dispositivo possui ainda um oscilador controlado digitalmente que foi utilizado neste trabalho a uma frequência de $12MHz$. Apesar de não oferecer a mesma precisão de um cristal (erro típico de $\pm 0.2\%$ e máximo de $\pm 1\%$), é suficiente para gerar o sinal de $40kHz$ com precisão suficiente, sendo apenas necessário assegurar uma tensão de alimentação estável.

4.2.2 Transdutores de ultra-sons

Os transdutores usados foram os Murata MA40S4T/R (frequência de ressonância de $40kHz$), que apresentam um bom compromisso entre custo, tamanho e fiabilidade, conforme foi estudado e demonstrado em [8].

Quatro receptores foram usados como uma tentativa de aumentar a fiabilidade do sistema, já que se constatou que com apenas dois receptores existem muitas falhas de eco, dificultando o processamento de sinal.

4.2.3 Buffers, Amplificação de sinal e Detector de envoltório

Para excitar o emissor de ultra-sons, é gerada uma onda quadrada de $40kHz$ durante $300\mu s$. Esta onda ataca uma configuração de buffers inversores (Figura 4.4) capaz de duplicar o sinal a ser emitido. É utilizado um condensador em série com o emissor de forma a filtrar a componente contínua do sinal (evitando danos no transdutor). O condensador foi dimensionado em $200nF$ de forma a ter uma impedância muito menor que a do transdutor a $40kHz$.

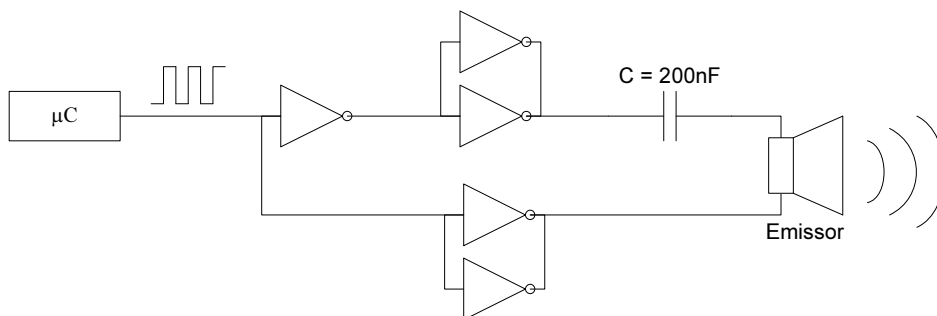


Figura 4.4: Configuração de buffers inversores utilizada para excitar o emissor de ultra-sons.

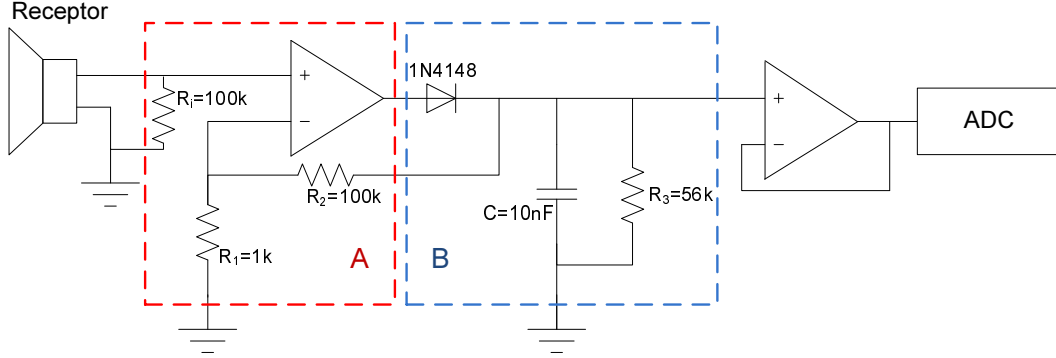


Figura 4.5: Circuito para amplificação, rectificação e detecção da envolvente do sinal proveniente dos receptores de ultra-sons.

No acondicionamento dos sinais provenientes dos receptores para a gama da ADC foi realizada a rectificação e amplificação dos mesmos. Para realizar a amplificação e rectificação é utilizado um amplificador operacional com a configuração não-inversora e alimentação unipolar, tal como está demonstrado no bloco A da Figura 4.5. Apesar de, para um amplificador ideal (ganho em malha aberta infinito), o ganho em malha fechada (G) estar projectado para:

$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \approx 100V/V \quad (4.1)$$

o ganho em malha aberta (A) do amplificador usado (MCP604) para uma frequência de $40kHz$ é apenas $100V/V$. Sendo assim, tem-se que o ganho em malha fechada é na realidade dado pela seguinte equação [12]:

$$G = \frac{1 + R_2/R_1}{1 + \frac{1+R_2/R_1}{A}} \approx 50V/V \quad (4.2)$$

Verificou-se experimentalmente, através de diversas medidas, que este valor é adequado para conseguir captar ecos até cerca de $30cm$, sem que para isso o sinal sature facilmente a distâncias curtas.

Para facilitar o processamento digital de sinal, é realizada a detecção da envolvente do sinal previamente amplificado (bloco B da Figura 4.5). Em contrapartida, o diodo presente no circuito de detecção da envolvente corta a porção de sinal inferior a $0.5V$ (queda de tensão nos seus terminais), ocultando muitas vezes ecos mais fracos. Na Figura 4.6 pode-se observar o sinal nos três estágios distintos do bloco de acondicionamento.

A amostragem digital do sinal recebido é realizada durante $3ms$, resultando num alcance máximo de $\approx 50cm$, tal como se comprova pela seguinte equação:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{0.5m \times 2}{343m/s} = 2.915ms \approx 3ms \quad (4.3)$$

Para obter uma resolução espacial razoável, fixou-se a frequência de amostragem em $10kHz$ (período de amostragem de $100\mu s$), resultando numa “janela” de 30 amostras por cada pulso enviado. Este conjunto de 30 amostras que constitui cada pulso será referenciado como “janela” daqui em diante.

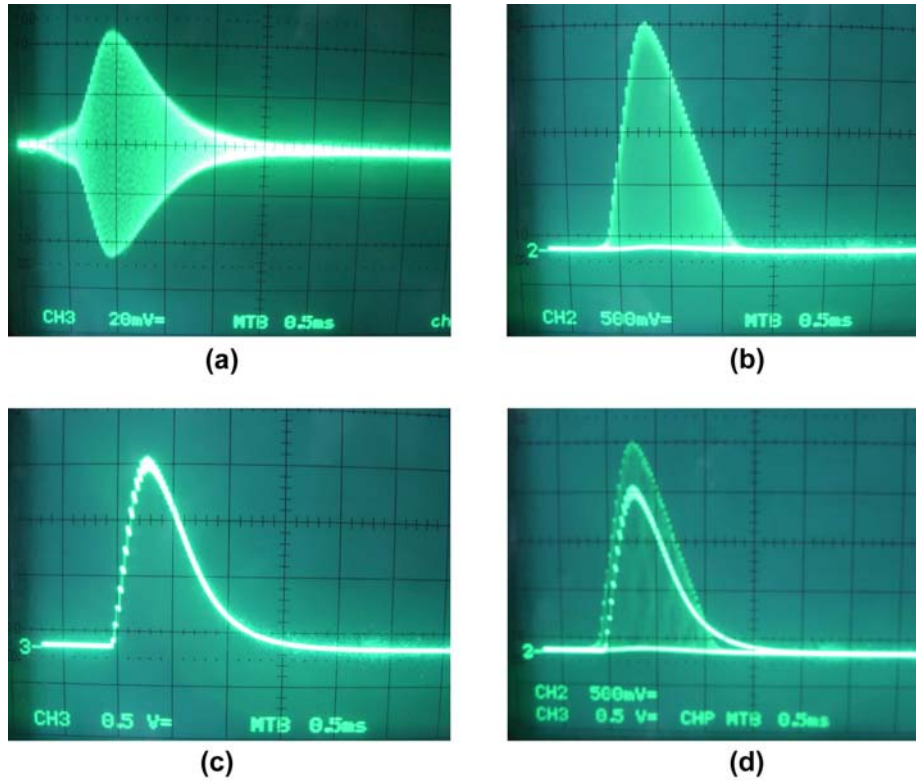


Figura 4.6: O sinal recebido nos receptores nos 3 estágios distintos de acondicionamento. (a) Sinal recebido pelos receptores; (b) Sinal após rectificação e amplificação; (c) Envolvente do sinal em (b); (d) Sobreposição dos sinais em (b) e (c), observando-se claramente a perda de $500mV$ devido ao diodo presente no circuito.

4.2.4 Comunicação μC -PC

Para facilitar o desenvolvimento do algoritmo de processamento digital de sinal, todas as aquisições realizadas na plataforma de testes foram guardadas no PC, através do programa Matlab. Com este software tornou-se fácil experimentar e testar os mais variados algoritmos sobre os mesmos sinais, não sendo necessário realizar novas aquisições na plataforma sempre que se desenvolviam novos algoritmos.

Para guardar todos os sinais adquiridos, foi utilizada a interface UART, já incluída no μC , comunicando pela porta série RS-232. Como a velocidade máxima de transmissão imposta pelo μC é $256kbit/s$, o dispositivo utilizado como interface entre o μC e o PC foi o MAX3238, já que possui uma taxa de transmissão maior ($400kbit/s$), possibilitando a transmissão dos dados em tempo-real.

4.2.5 Alimentação

A plataforma de testes é alimentada através de uma fonte de tensão fixa de $5V$, mas como o produto final deverá operar até $3.6V$ (limite do μC), é feita a regulação para $3.3V$ através de um LM2937. Todo o circuito é alimentado com os $3.3V$, com excepção do servo motor e sensor óptico (que só operam correctamente a partir de $4.5V$), tal como se pode observar no

diagrama de blocos da Figura 4.2, no qual as cores cinzenta e branca representam os módulos alimentados com $5V$ e $3.3V$, respectivamente.

4.2.6 Servo Motor

O servo motor utilizado no projecto foi o HS-422, da Hitec, inserido numa base giratória (Figura 4.7). Este modelo é de baixa gama e possui um torque reduzido ($4.1kg.cm$), apresentando pouca precisão no seu posicionamento e dificuldade em vencer a força de atrito dos rolamentos e momento de inércia da haste, especialmente em movimentos lentos (apesar dos esforços realizados para utilizar materiais o mais leve possíveis). Apesar das dificuldades inerentes à fraca qualidade do modelo utilizado, foi utilizada uma técnica para a aquisição de sinais que permitiu suplantá-las. Esta será explicada mais à frente.

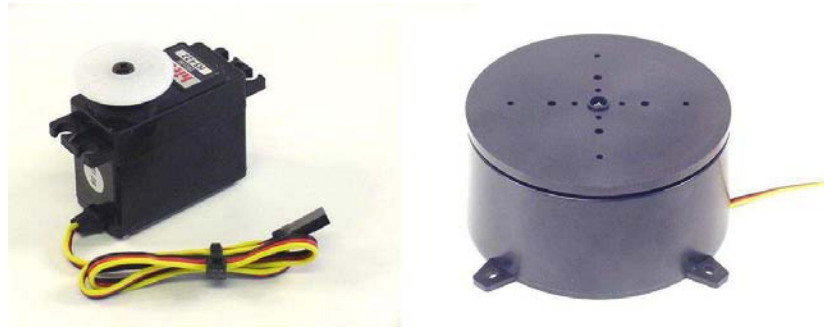


Figura 4.7: Servo motor HS-422 e base giratória na qual está inserido.

O circuito introduzido no PCB para controlo do servo motor consiste apenas num buffer não-inversor (modelo CD74AC244) para fornecer o drive de corrente que este necessita.

O servo motor é um mecanismo muito simples de utilizar. Necessita apenas de ser alimentado com uma tensão DC entre $4.8V$ a $6V$ para operar e o ângulo que ocupa é controlado por um sinal PWM. O sinal deve ser enviado a $50Hz$ e o duty-cycle determina o ângulo, correspondendo a gama de duty-cycle $0.6ms$ a $2.4ms$ à gama de ângulos -90° a 90° , respectivamente [4]. Como os sensores estão colocados a cerca de $35cm$ do eixo de rotação, esta gama traduz-se num percurso de aproximadamente $110cm$, tal como se verifica pela seguinte equação:

$$percurso = \pi \times 35cm \approx 110cm \quad (4.4)$$

Esta é uma distância suficiente para simular percursos com diversos desníveis, dos mais variados tipos.

Como o servo motor apenas recebe informação sobre o ângulo que deve ocupar, deslocando-se até este à máxima velocidade possível, o controlo da velocidade foi uma necessidade que surgiu logo de início. Foi necessário implementar um pequeno algoritmo de controlo de velocidade, que consistia em realizar incrementos/decrementos de duty-cycle a cada $20ms$, mudando a posição gradualmente. Para ter velocidades maiores ou menores basta ter incrementos maiores ou menores, respectivamente. Como as actualizações de posição são realizadas a $50Hz$, este movimento parece fluido para o olho humano.

4.2.7 Sensor óptico

O sensor óptico utilizado foi o GP2D120, da Sharp Microelectronics (Figura 4.8). Este foi o modelo escolhido devido principalmente à sua simplicidade de utilização, baixo custo e gama de alcance se adequar aos objectivos do trabalho (4cm a 30cm).

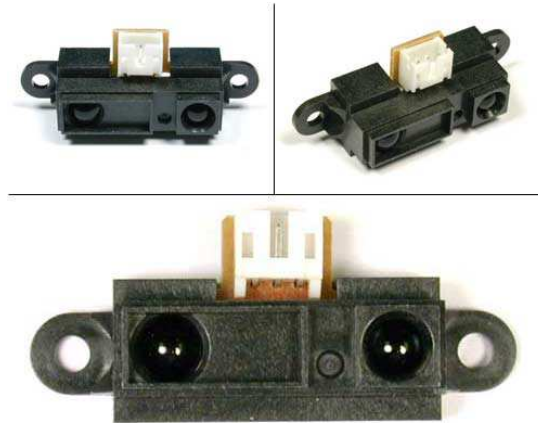


Figura 4.8: Sensor óptico GP2D120.

Funcionamento geral do sensor

Este dispositivo já tem todo o hardware e equipamento para processamento de sinal incluídos no seu interior e o seu funcionamento baseia-se no princípio de triangulação. Um LED emite luz ciclicamente e um array linear CCD detecta o ângulo sob o qual o reflexo de um dado obstáculo incide no receptor, permitindo à unidade de processamento calcular a distância a que o obstáculo se encontra. O diagrama de blocos interno do GP2D120 está representado na Figura 4.9, tal como se encontra no datasheet do mesmo.

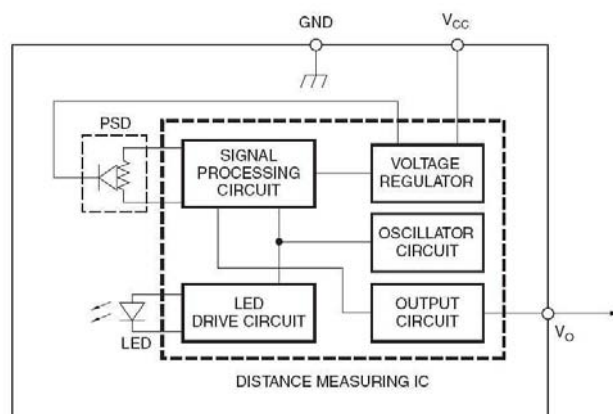


Figura 4.9: Diagrama de blocos do sensor GP2D120.

A distância medida pelo dispositivo é devolvida no sinal analógico V_o . A relação entre a distância L a que um obstáculo se encontra e a tensão de saída V_o é não linear, estando

representada na Figura 4.10 a curva $V_o(L)$ característica, tal como se encontra apresentado no datasheet do dispositivo. Como V_o varia entre $0.3V$ e $3V$ na gama de alcance do sensor, não é necessário acrescentar hardware para acondicionamento de sinal, pois este já se encontra na gama da ADC. A nível de hardware, apenas teve que ser inserido um filtro passa-baixo RC de 1ª ordem na alimentação do dispositivo, já que este produzia muito ruído nas linhas de alimentação, afectando os restantes componentes do circuito, destruindo por completo o sinal recebido nos receptores de ultra-sons.

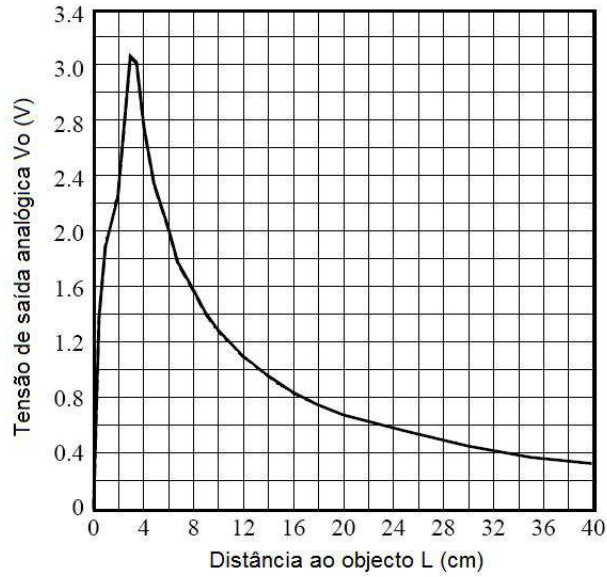


Figura 4.10: Curva $V_o(L)$ característica do GP2D120.

Como a Sharp Microelectronics não disponibiliza nenhuma informação com valores concretos para a tensão de saída em função da distância, foi necessário construir uma tabela para o efeito. Realizaram-se várias aquisições a diversas distâncias ao longo da gama de alcance do sensor, resultando na curva $V_o(L)$ apresentada na Figura 4.11. Para realizar a conversão de tensão para distância é realizada uma interpolação linear entre os dois pontos obtidos experimentalmente que abranjam o valor devolvido pelo sensor. Este método oferece uma boa aproximação da distância medida, com um erro absoluto máximo de aproximadamente $5mm$.

Para caracterizar o sinal devolvido pelo sensor, foram realizadas algumas experiências. Efectuaram-se aquisições de 60000 amostras @ $1kHz$ ao longo de várias distâncias, na gama de alcance do sensor, sobre uma folha de papel branco. No gráfico da Figura 4.12 é possível observar um trecho de algumas das aquisições, no qual se pode verificar que o sinal é razoavelmente constante (oscilações até $30mV_{pp}$), tendo no entanto alguns picos aleatórios que podem desviar-se até cerca de $100mV$. Este ruído terá que ser obviamente filtrado.

A distribuição característica da saída do GP2D120 encontra-se representada na Figura 4.13, que consiste no histograma do sinal obtido a $24cm$. Já na Tabela 4.1 são apresentados os dados estatísticos para os sinais obtidos a diversas distâncias. Através destes dados, torna-se claro que é conveniente realizar a média de várias amostras antes de converter a tensão em distância. Convém denotar que o desvio padrão se mantém aproximadamente constante ao

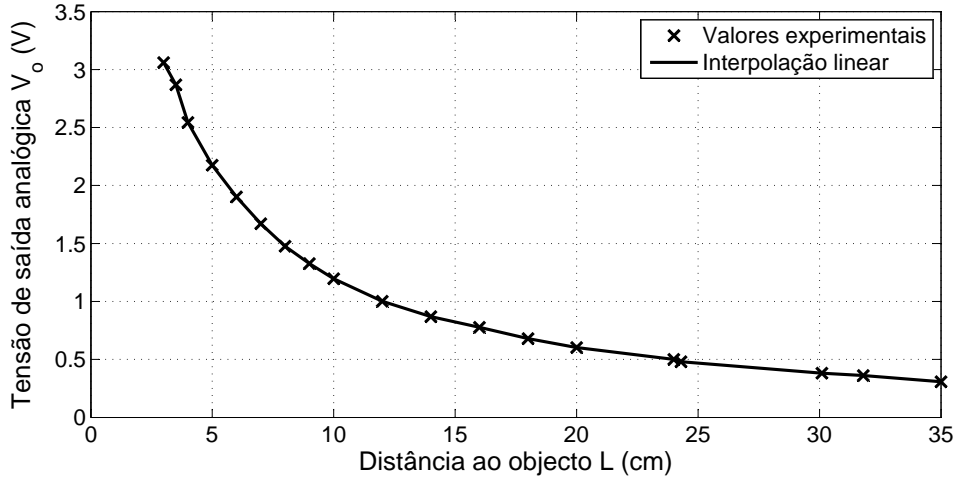


Figura 4.11: Curva $V_o(L)$ do sensor GP2D120, obtida experimentalmente.

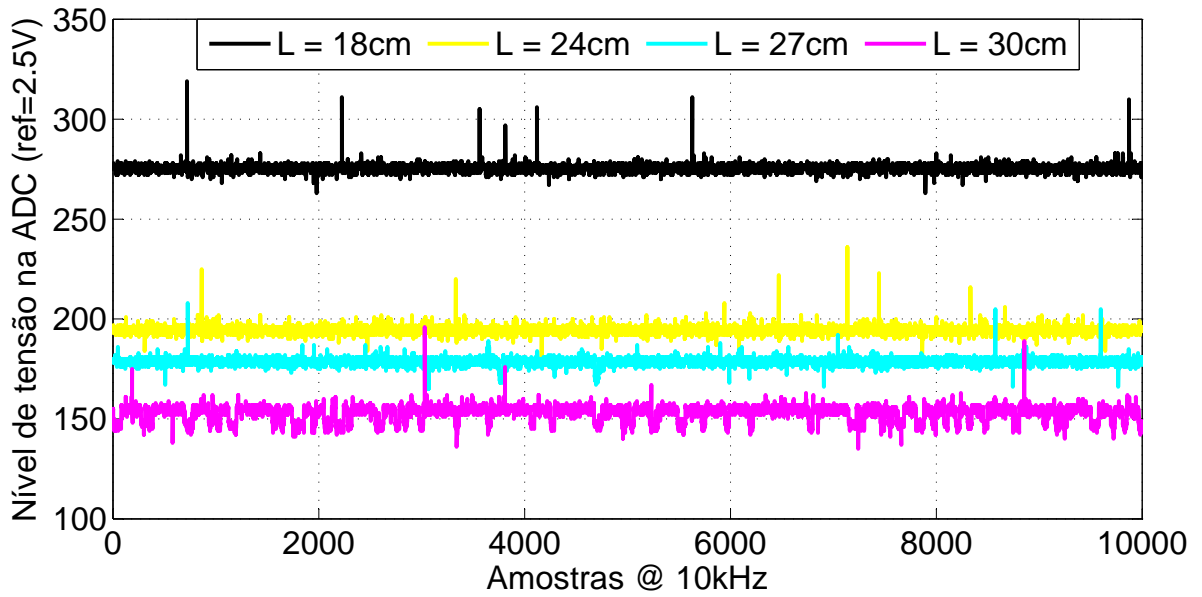


Figura 4.12: Tensão de saída lida na ADC (10 bits de quantificação com referência a 2.5V).

longo de toda a gama de alcance (com excepção dos limites da mesma), mas como a resposta do sensor é não-linear, este possui menos precisão a distâncias maiores. Este facto verifica-se facilmente através da Figura 4.11, já que a uma pequena variação na tensão corresponde uma grande variação na distância.

Depois de analisar o comportamento estático do sensor, foi necessário estudar o comportamento dinâmico do mesmo. Após alguns testes com o sensor em movimento, verificou-se que o nível de tensão na saída varia em degraus, durando cada um destes aproximadamente $40ms$, tal como está descrito no esquema da Figura 4.14. Já na Figura 4.15 é possível observar esse comportamento aquando da variação da distância. Como cada degrau permanece

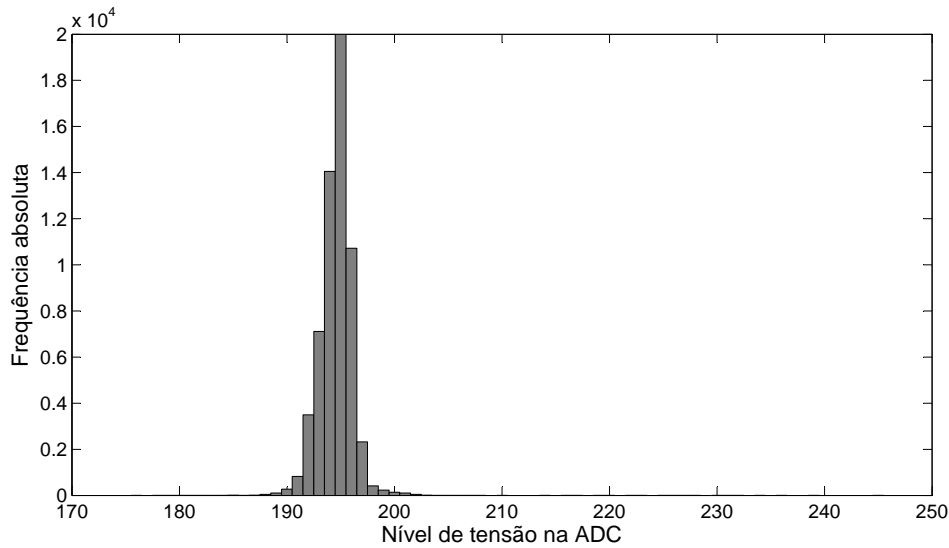


Figura 4.13: Histograma da aquisição realizada a 24cm.

<i>L</i>	5cm	8cm	12cm	18cm	24cm	27cm	30cm
Média	925.26 (2.26V)	606.22 (1.48V)	421.81 (1.03V)	275.51 (673mV)	194.59 (476mV)	178.79 (437mV)	153.08 (374mV)
Desvio padrão	2.45 (6mV)	1.95 (4.8mV)	1.73 (4.2mV)	1.69 (4.1mV)	1.71 (4.2mV)	1.65 (4mV)	3.77 (9.2mV)
Mínimo	906 (2.21V)	586 (1.43V)	403 (0.98V)	256 (626mV)	176 (430mV)	159 (389mV)	134 (328mV)
Máximo	967 (2.36V)	649 (1.59V)	465 (1.14V)	320 (782mV)	245 (598mV)	224 (547mV)	201 (491mV)

Tabela 4.1: Dados estatísticos dos sinais devolvidos pelo GP2D120.

durante cerca de 40ms, bastará calcular a média das amostras pertencentes a cada degrau para obter uma boa aproximação do nível de tensão correcto, correspondente à distância que se está a medir. Este método pode ter, em contrapartida, um atraso relativamente grande, já que poderão decorrer até 80ms entre a passagem para uma nova distância e o reconhecimento dessa mesma distância por parte do microcontrolador.

Efeito das propriedades reflectoras das superfícies nas medições do GP2D120

É sabido que as propriedades reflectoras dos materiais podem influenciar os resultados dos sensores ópticos. Por este motivo, realizaram-se algumas aquisições em materiais com propriedades reflectoras distintas, de forma a analisar o desempenho do sensor GP2D120 nas mesmas.

Verificou-se que em superfícies espelhadas, nomeadamente tijoleira polida, o valor devolvido pelo sensor é inferior ao esperado, indicando distâncias maiores do que na realidade são. Apesar de o desvio padrão não sofrer alterações, a discrepância é maior a distâncias superiores, podendo ir de 0.5cm a 9cm do obstáculo, até 5cm a 20cm do mesmo. Este efeito, para além de reduzir drasticamente a gama de alcance do sensor neste tipo de superfícies, pode

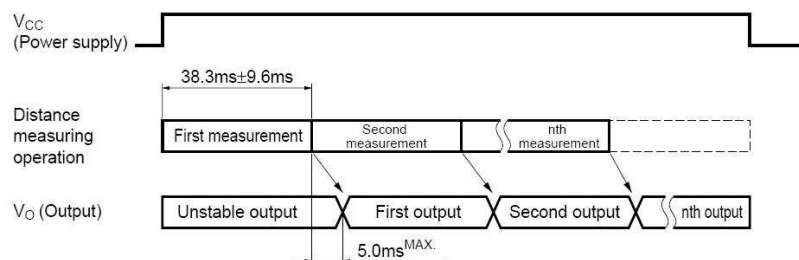


Figura 4.14: Tempo de atraso do GP2D120 na medição de distâncias (retirado do datasheet do dispositivo).

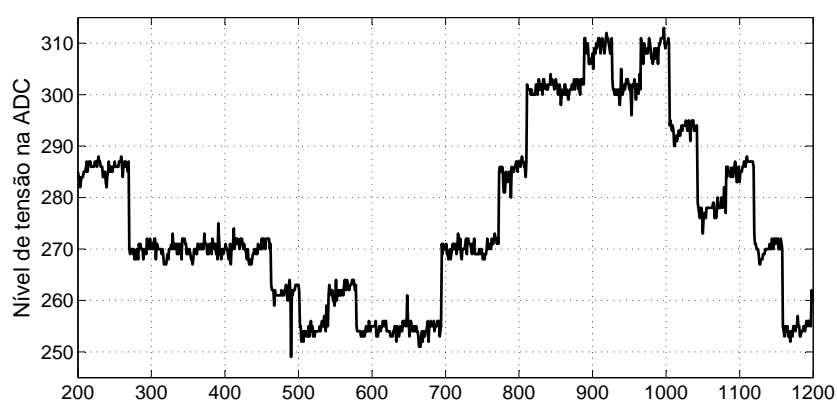


Figura 4.15: Variação da tensão de saída em degraus ($f_a = 1kHz$).

levar a que sejam detectados desníveis inexistentes aquando da passagem para superfícies com propriedades distintas.

Efeito da luz solar nas medições do GP2D120

Tal como as propriedades reflectoras das superfícies, a intensidade de luz solar também é um factor passível de afectar o desempenho dos sensores ópticos. Conduziram-se uma série de experiências para classificar o desempenho do GP2D120 na presença de uma luminosidade solar elevada. Para esse efeito, realizaram-se diversas aquisições num dia de céu limpo, em diversas superfícies (irregulares e lisas), tanto em zonas iluminadas directamente pelo sol como em zonas resguardadas do mesmo.

Para observar com clareza o efeito da luz solar, são apresentadas na Figura 4.16 duas aquisições obtidas em situações distintas de luminosidade. Ambas foram obtidas enquanto se movimentava a bengala a uma altura constante do solo (cerca de $12.5cm$). Verifica-se que o sinal obtido na sombra (Figura 4.16(a)) se mantém aproximadamente constante, medindo em média $12.18cm$ e apresentando um desvio padrão de $0.27cm$. Por outro lado, a medida realizada ao sol (Figura 4.16(b)) não tem qualquer validade, variando numa gama superior a $20cm$. Os dados estatísticos também comprovam a perda de fiabilidade devido ao sol, tendo sido registada uma distância média de $18.42cm$ e um desvio padrão de $6.14cm$.

Mediante os testes realizados, constatou-se que não será possível recorrer a este sensor, em específico, para realizar a detecção de desníveis, já que ao longo dos seus percursos diários

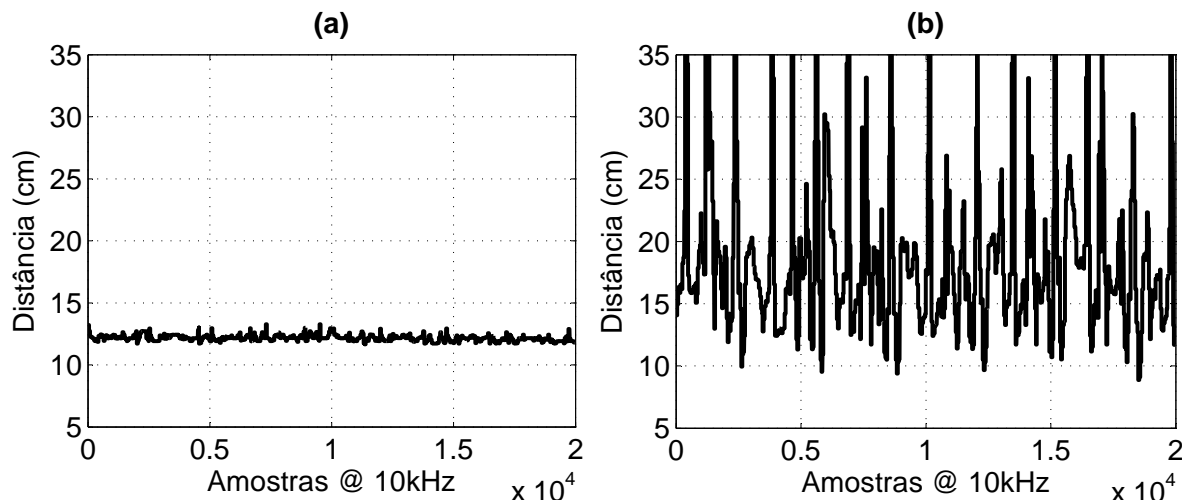


Figura 4.16: Aquisições dinâmicas, mantendo uma distância de cerca de 12.5cm de uma superfície de calçada, primeiro à sombra (a) e de seguida ao sol (b).

os cegos acabam sempre por passar em zonas expostas à luz solar.

4.3 Criação de um banco de dados

O objectivo principal da plataforma de testes consistia em criar um banco de dados que pudesse ser usado para testar os mais diversos algoritmos, tanto no decorrer deste projecto como em continuações do mesmo em anos futuros. Nesse sentido, foi necessário que em cada aquisição houvesse informação das condições em que foram realizadas e dos instantes em que ocorreram os desníveis. Para esse efeito, tiraram-se fotografias a todas as montagens e registaram-se as condições mais pertinentes num logfile. Quanto ao registo dos instantes de ocorrência dos desníveis, adoptou-se uma técnica que passará a ser descrita.

4.3.1 Registo dos instantes de ocorrência de desníveis

A ideia inicial para registar os instantes de ocorrência de desníveis consistia em acompanhar o envio de todas as amostras com a informação do ângulo ocupado pelo servo motor. Se a posição do desnível fosse medida e registada, seria fácil saber quais as amostras que estariam antes e após o desnível. No entanto, devido à imprecisão tanto do servo motor como do oscilador do microcontrolador (que impossibilita o envio do PWM com um duty-cycle preciso), este método iria oferecer pouca precisão.

Como o sensor óptico envia um feixe bastante direccionado e oferece resultados precisos e fiáveis (em condições controladas), recorreu-se ao GP2D120 para indicar as distâncias dos sensores ultra-sónicos ao solo em cada instante. No entanto, como já foi analisado anteriormente, o sensor GP2D120 tem uma taxa de actualização de 25Hz, tornando-se demasiado lento para a frequência de amostragem dos ultra-sons (nunca inferior a 100Hz). Para contornar esta dificuldade, cada amostra foi adquirida com o servo motor parado, de forma a dar tempo suficiente ao GP2D120 de actualizar a sua medida. Apesar de as amostras serem adquiridas com o servo motor parado, é possível simular o movimento contínuo de uma bengala branca, bastando para isso realizar incrementos de ângulo constantes no servo motor. O valor deste

incremento depende da velocidade de deslocação do utilizador, v_x , e da frequência de envio de pulsos de ultra-sons (apelidado daqui em diante apenas por “frequência de pulso”), f_{pulso} , e pode ser calculado, em graus, através da equação:

$$\theta = \frac{v_x}{r \cdot f_{pulso}} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.5)$$

em que r representa a distância dos sensores ao eixo de rotação ($35cm$). A velocidade a que um cego se desloca está aproximadamente compreendida entre $1m/s$ e $1.5m/s$, tal como foi calculado no capítulo 3. Como as velocidades de deslocação inferiores são as mais problemáticas, pois aumentam a probabilidade de enviar vários pulsos consecutivos em pontos “sem eco”, atribuiu-se a v_x a velocidade mínima, $1m/s$. Para f_{pulso} atribuiu-se $100Hz$, resultando em incrementos lineares de $1cm$ e angulares de 1.6° .

4.3.2 Diferentes tipos de superfície

Depois de se ter determinado o método de aquisição, procedeu-se ao levantamento do tipo de desníveis passíveis de serem encontrados num percurso pelas vias públicas, de forma a simular todas as situações possíveis.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as ilustrações dos vários tipos de desníveis, juntamente com o nome pelo qual serão referenciados no decorrer deste documento.

4.3.3 Aquisição de dados

Depois de toda a preparação estar realizada, passou-se finalmente para a simulação de desníveis e aquisição de dados na plataforma de testes. De seguida, vão ser apresentadas algumas das aquisições efectuadas, exemplificativas de cada um dos tipos de desníveis. Cada aquisição será apresentada por intermédio de três imagens: uma fotografia da montagem efectuada, um gráfico com o sinal recebido pelos receptores de ultra-sons e outro gráfico com as medições do GP2D120. Os gráficos que contêm o sinal recebido pelos receptores de ultra-sons são constituídos pelos eixos **X** (janela de 30 amostras@ $10kHz$, representativa de cada pulso recebido), **Y** (pulsos recebidos ao longo do tempo @ $100Hz$) e **Z** (nível de tensão medido na ADC de 10bits, sendo que a referência é $2.5V$). Em cada exemplo, os eixos são orientados de forma a perceber melhor o desnível que se pretende visualizar. O sinal do sensor óptico permitirá ao leitor aperceber-se facilmente de qual o instante exacto da ocorrência do desnível.

Superfície lisa

Esta aquisição foi realizada sobre uma tábua lisa, a uma altura constante (aproximadamente $10cm$), tal como demonstra a Figura 4.17. Observa-se pela Figura 4.18(a) que os ultra-sons têm um comportamento ideal neste tipo de superfícies, mantendo uma amplitude constante ao longo de todo o percurso, sem qualquer falha de eco. O sensor óptico oferece uma informação bastante precisa da distância ao solo, em cada pulso de ultra-sons enviado, tal como se verifica na Figura 4.18(b).

Superfície irregular

Esta aquisição foi realizada nas mesmas condições que a anterior, exceptuando a superfície utilizada, que consistiu em tijoleira com a textura apresentada na Figura 4.19. Os resultados


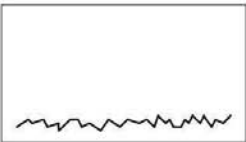
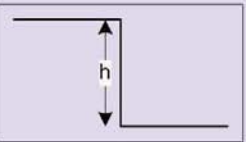
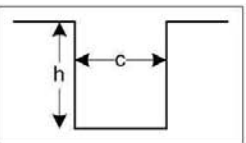
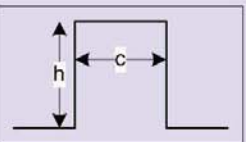
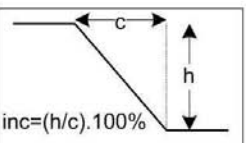
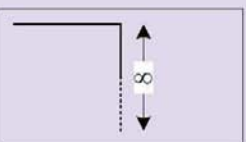
Nome	Ilustração	Exemplos
Superfície lisa		<ul style="list-style-type: none"> - Linóleo; - Soalho; - Tijoleira lisa.
Superfície irregular		<ul style="list-style-type: none"> - Calçada; - Tijoleira com relevo; - Estradas de paralelo
Degrau (a descer)		<ul style="list-style-type: none"> - Degraus das escadas; - Lancil do passeio.
Fissura		<ul style="list-style-type: none"> - Passeios e estradas deterioradas; - Grelhas de escoamento de água.
Saliência		<ul style="list-style-type: none"> - Pequenos objectos caídos.
Rampa (a descer)		<ul style="list-style-type: none"> - Rampas de acesso para deficientes; - Passeios com acesso a garagens.
Buraco		<ul style="list-style-type: none"> - Tampas de saneamento abertas.

Tabela 4.2: Ilustração dos diferentes tipos de desníveis que se podem encontrar.

obtidos nesta experiência são visivelmente diferentes dos anteriores (Figura 4.20). Nesta superfície, a amplitude dos ecos recebidos varia muito, havendo mesmo pulsos cujo eco não é detectado pelos receptores de ultra-sons. Esta experiência demonstra uma das principais dificuldades no uso de ultra-sons como método de detecção de desníveis, já que as falhas de eco neste tipo de superfícies pode ser confundida com buracos profundos. Tendo em conta

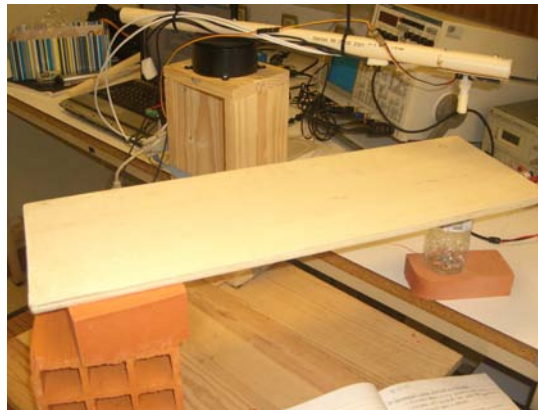


Figura 4.17: Montagem usada para a simulação de uma superfície lisa

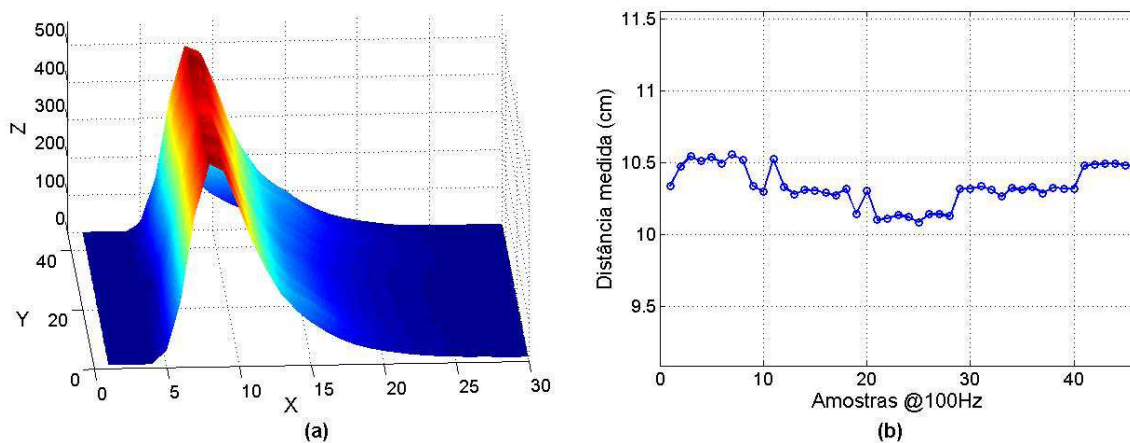


Figura 4.18: Sinais obtidos durante a aquisição sobre uma superfície lisa. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.

que a maioria das superfícies nas vias públicas são muito irregulares (como é o caso da calçada portuguesa), o algoritmo de processamento de sinal a ser implementado deve ser capaz de distinguir as falhas de eco de buracos reais.

Degrau

Os degraus constituem o tipo de desnível mais comum nas vias públicas (forma idêntica à montagem da Figura 4.21), representando muitas vezes a transição de um passeio para a via rodoviária. Por essa razão, o algoritmo de detecção de desníveis deverá ser capaz de detectar eficazmente este tipo de desnível em especial. Felizmente, o sinal recebido nos ultra-sons permite identificar facilmente degraus. Como se observa na Figura 4.22, quando se dá a passagem por um degrau, ocorre uma transição brusca na posição do máximo da envolvente do sinal recebido (apelidemos de “pico da envolvente”), bem como uma redução significativa na amplitude do sinal (devido à atenuação do som no ar). No entanto, a detecção de um degrau é tanto mais difícil quanto menor for o degrau, já que as alterações no sinal recebido são mais subtis.



Figura 4.19: Material usado para a simulação de uma superfície irregular.

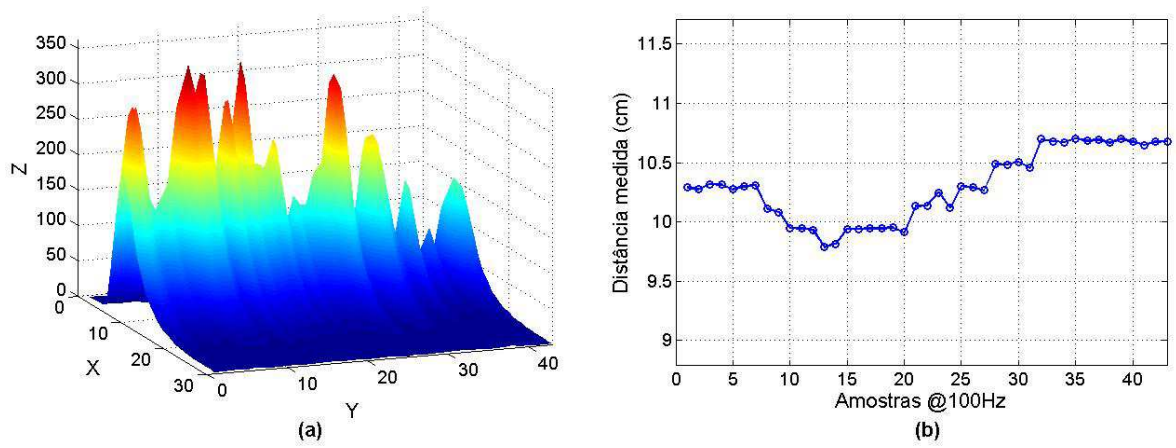


Figura 4.20: Sinais obtidos durante a aquisição sobre uma superfície irregular. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.

Um degrau a subir não é representado aqui pois tem um comportamento idêntico, mas inverso, ao de um degrau a descer.

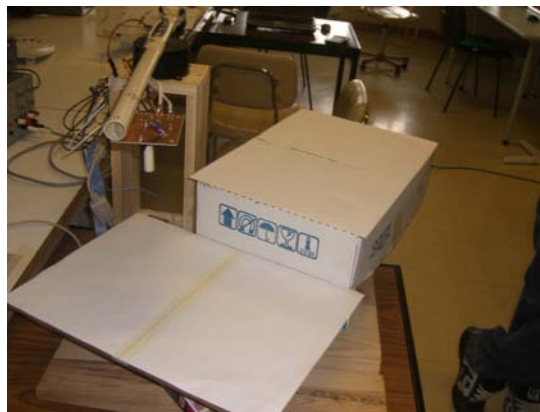


Figura 4.21: Montagem usada para a simulação de um degrau.

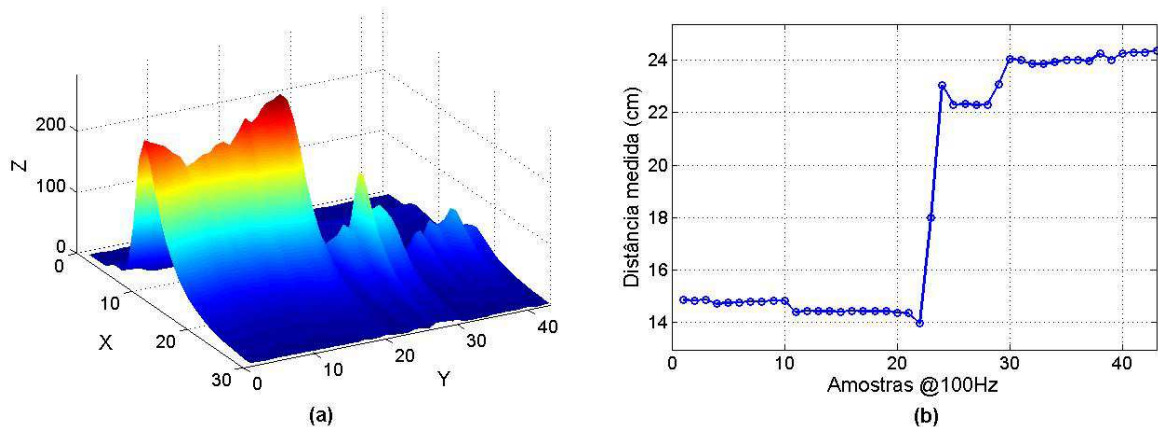


Figura 4.22: Sinais obtidos durante a aquisição a simular um degrau. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.

Fissura

Para exemplificar as fissuras, foram realizadas duas montagens que representam situações distintas. A primeira, apresentada na Figura 4.23, pode representar pequenas falhas na superfície e o sinal que devolve pode ser interpretado como dois degraus sucessivos (primeiro a descer e de seguida a subir), tal como se observa na Figura 4.24.

Uma saliência tem um comportamento idêntico, mas inverso, ao representado na Figura 4.24.



Figura 4.23: Montagem usada para a simulação de uma fissura.

A montagem da Figura 4.25 pretende simular não uma fissura isolada, mas uma superfície composta por inúmeras fissuras pequenas, que não devem ser alertadas ao utilizador. As grelhas de escoamento de água para o esgoto são um bom exemplo deste tipo de superfícies. Como se pode observar na Figura 4.26(a), estas fissuras sucessivas podem representar um problema, já que o pico da envolvente transita sucessivamente entre as posições respeitantes à superfície superior e inferior.

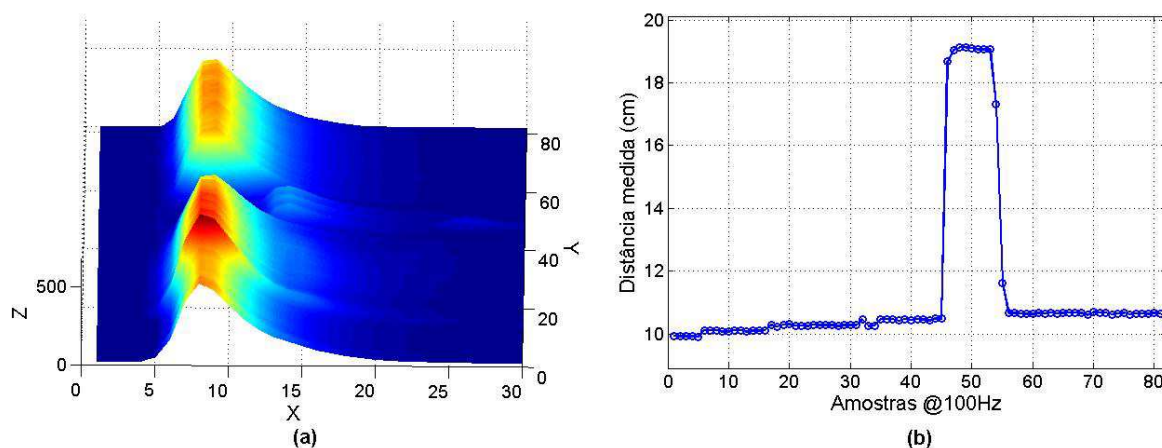


Figura 4.24: Sinais obtidos durante a aquisição a simular uma fissura. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.



Figura 4.25: Montagem usada para a simulação de uma superfície com diversas fissuras.

Rampa

Os desníveis do tipo rampa podem ser difíceis de detectar, mesmo com inclinações elevadas (cerca de 50% nesta experiência), já que o pico da envolvente efectua uma transição de posição muito suave ao longo da rampa, tal como se observa na Figura 4.28(a). Esta transição suave pode ser confundida com a oscilação vertical da bengala, proveniente do movimento natural do braço do utilizador.

Buraco

Neste documento, são considerados buracos todas as superfícies que se encontrem a uma profundidade superior ao alcance dos ultra-sons (50cm no caso desta série de experiências). Apesar de não serem muito frequentes, são os desníveis que representam maior perigo, devendo a sua detecção ser, portanto, infalível e rápida. O sinal nos buracos caracteriza-se pela ausência completa de eco, tal como se observa na Figura 4.30(a). A maior dificuldade será detectar buracos rapidamente sem os confundir com falhas de eco provenientes das características da superfície.

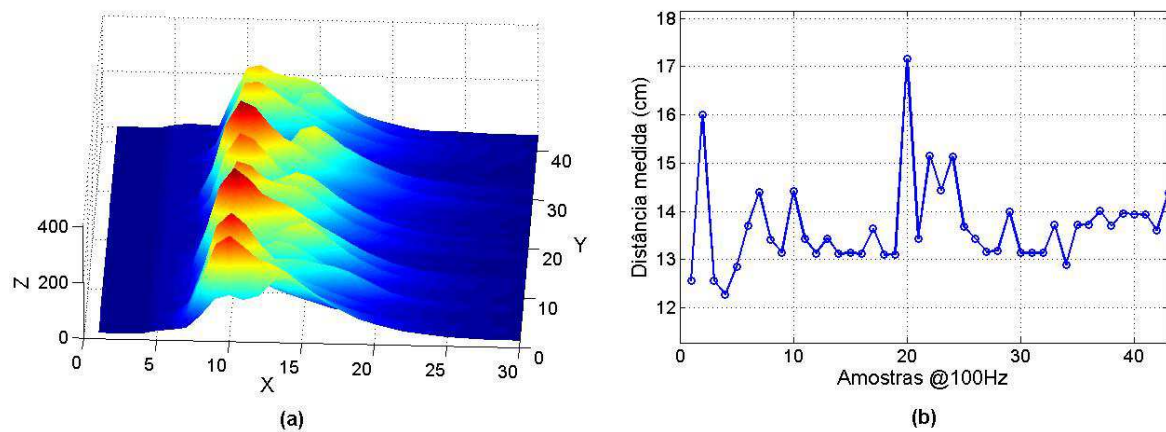


Figura 4.26: Sinais obtidos durante a aquisição sobre uma superfície com diversas fissuras. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.



Figura 4.27: Montagem usada para a simulação de uma rampa.

4.3.4 Análise de resultados da plataforma de testes

Os resultados obtidos na plataforma de testes confirmaram o seu bom desempenho na aquisição de sinais ultra-sónicos na presença de desníveis, sendo apresentado explicitamente o instante de ocorrência do desnível através do sinal obtido no sensor óptico. Com as aquisições realizadas foi possível perceber o padrão característico de cada tipo de desnível, tornando-se mais fácil preparar um algoritmo para a sua detecção. O desenvolvimento de tal algoritmo será abordado no capítulo que se segue.

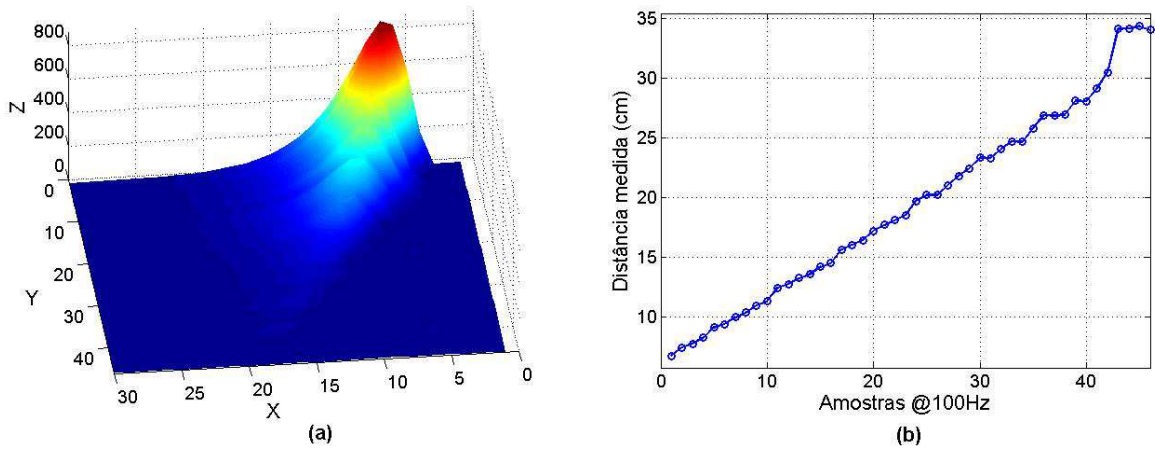


Figura 4.28: Sinais obtidos durante a aquisição a simular uma rampa descendente. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.



Figura 4.29: Montagem usada para a simulação de um buraco profundo.

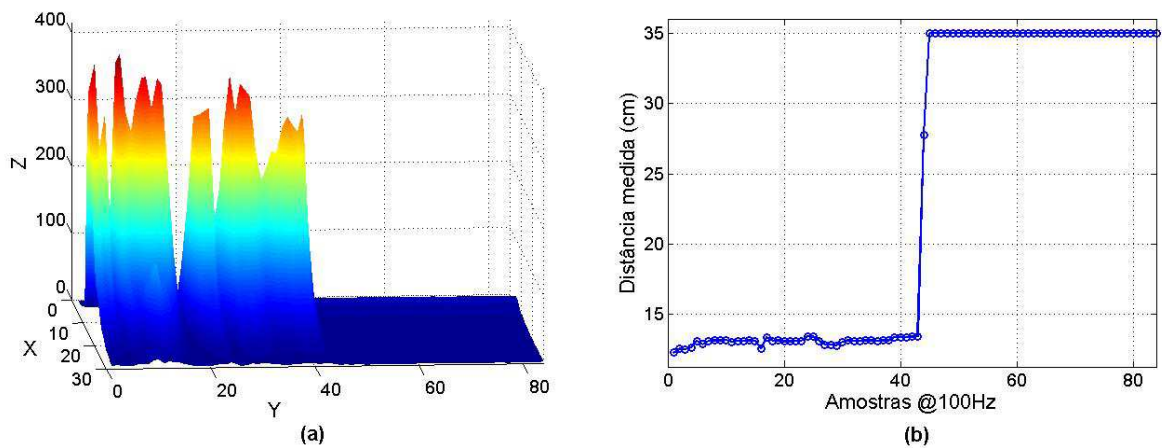


Figura 4.30: Sinais obtidos durante a aquisição a simular um buraco profundo. Em (a) está representada a envolvente do sinal ultra-sónico e em (b) as medições auxiliares do GP2D120.

Capítulo 5

Detecção rápida e robusta de desníveis

Depois de ter todo o equipamento preparado, foi possível começar com o desenvolvimento do algoritmo de detecção de desníveis, assunto sobre o qual se debruça este capítulo. No entanto, antes de passar à descrição do mesmo, será apresentado um breve resumo sobre o algoritmo desenvolvido para a versão anterior da bengala. Desta forma, poderão ser tecidas comparações entre as duas versões.

5.1 Detecção de desníveis (versão 2008)

De forma a facilitar a explicação do algoritmo presente no protótipo desenvolvido em 2008, desenhou-se o diagrama presente na Figura 5.1, ilustrativo do tratamento dado ao conjunto de amostras de cada pulso recebido.

5.1.1 Descrição do algoritmo

Antes de iniciar a descrição do diagrama, é necessário referenciar que a aquisição de cada pulso é realizada de forma idêntica à descrita no capítulo anterior (janelas de 30 amostras com $f_a = 10kHz$), excepto que são usados apenas dois receptores e a frequência de pulso é aproximadamente $166Hz$.

Observando agora o diagrama da Figura 5.1, verifica-se que o primeiro passo consiste em determinar a média dos dois receptores, resultando numa única janela de 30 amostras, representada por x_i . De seguida cada amostra passa por um filtro passa-baixo IIR de primeira ordem, $I(Z)$, com o intuito de mitigar o problema das falhas de eco em superfícies irregulares. A resposta do filtro é dada por:

$$y_i[n] = (1 - \alpha) \times x_i[n] + \alpha \times y_i[n - 1] \quad (5.1)$$

aplicando a transformada de Z , resulta na função de transferência:

$$I(Z) = \frac{Y_i(Z)}{X_i(Z)} = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha \cdot Z^{-1}}, |Z| > \alpha \quad (5.2)$$

em que $\alpha = 0.9$ (determinado heurísticamente). O efeito deste filtro pode ser observado na Figura 5.2, que consiste no sinal da Figura 4.20(a) após filtragem com $I(Z)$. Verifica-se que todas as falhas de eco desapareceram.

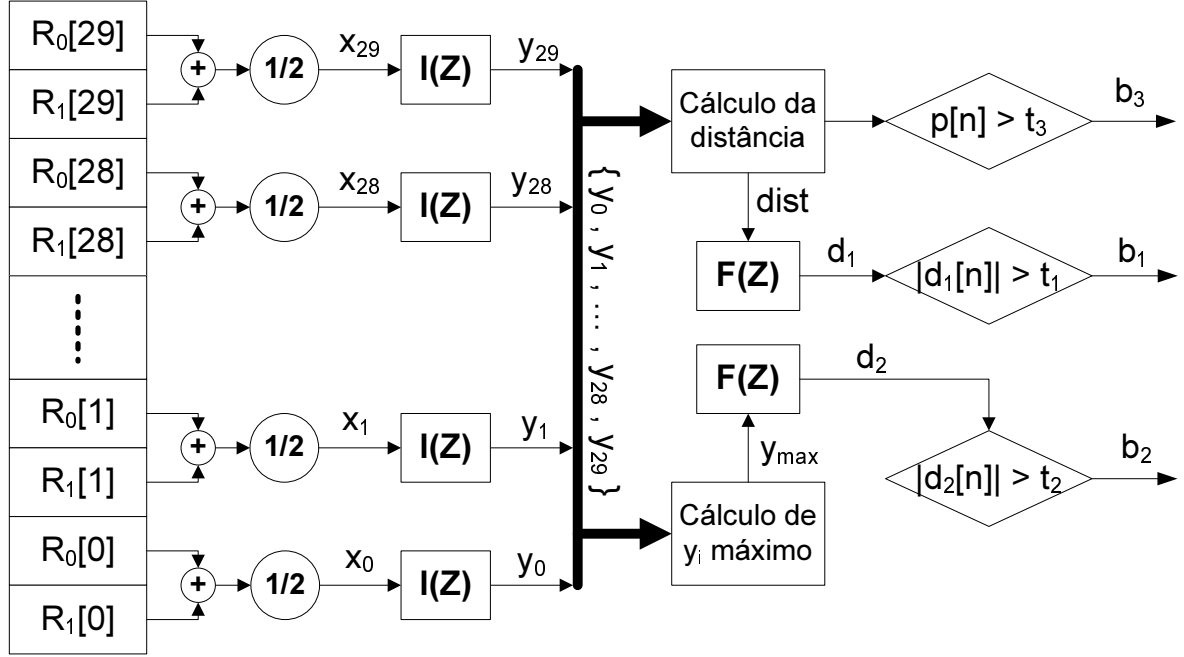


Figura 5.1: Diagrama de blocos ilustrativo do tratamento dado às amostras de cada pulso recebido (versão 2008).

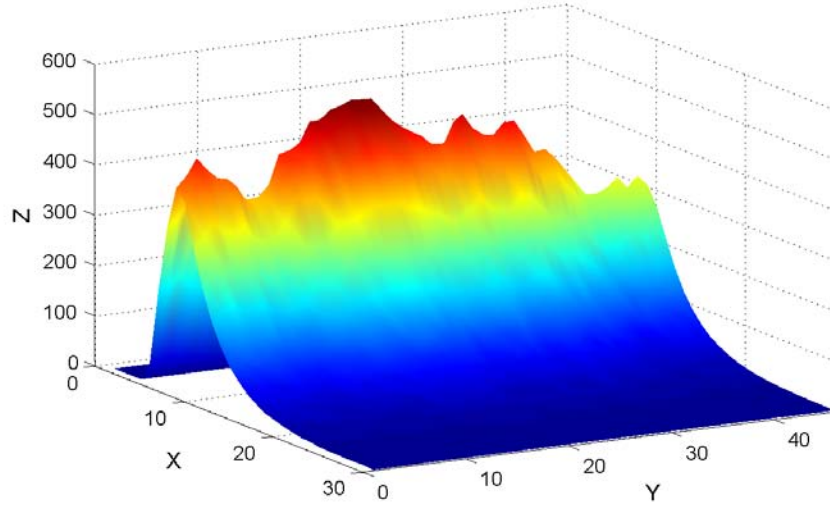


Figura 5.2: Sinal da Figura 4.20(a) após filtragem com $I(Z)$.

Tendo assegurado um sinal suave, sem falhas de eco, é possível passar à detecção de desníveis. Essa detecção é realizada através de dois métodos distintos. O primeiro e mais importante, recorre ao sinal distância $dist$, que é calculado através da posição ocupada pelo máximo de cada janela. Este sinal passa por um filtro FIR, $F(Z)$, cujo objectivo é calcular a variação da distância (derivada de $dist$). A resposta ao impulso de $F(Z)$ é dada por:

$$h = [-1, -1, -1, -1, -1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1] \quad (5.3)$$

que consiste na convolução de um filtro integrador com um diferenciador, calculando assim a derivada e filtrando o ruído (pequenas variações devido a irregularidades no terreno) ao mesmo tempo. Se o módulo da resposta do filtro, d_1 , ultrapassar o limiar t_1 , é assinalado um buraco. O valor de t_1 foi estabelecido em 30 (determinado experimentalmente), o que corresponde à detecção de um desnível com uma altura mínima de aproximadamente 6cm. O segundo método de detecção surge para colmatar a ineficiência do primeiro quando na presença de buracos profundos. Nestes não existe (virtualmente) uma transição de distância, já que não existe eco e o filtro IIR mantém durante algum tempo a forma de onda registada antes do buraco. Para detectar os buracos é usado novamente o filtro FIR, mas neste caso para detectar variações de amplitude do sinal. Como em buracos a amplitude do sinal x_i é nula, a queda de amplitude em y_i é máxima. Para ser considerada a presença de um buraco, basta que d_2 ultrapasse o limiar t_2 , ao qual foi atribuído o valor 1800 (determinado heurísticamente).

Existe ainda um alerta dado ao utilizador quando a bengala se encontra a mais de 30cm da superfície.

5.1.2 Problemas inerentes ao algoritmo

Apesar do algoritmo conseguir realizar correctamente a detecção de desníveis com altura superior a 6cm e de estar bem protegido contra falsos positivos, possui ainda algumas falhas. Um dos problemas consiste na altura mínima detectável (6cm), já que desníveis com cerca de 3cm já são suficientes para apresentar perigo. No entanto, o elevado atraso na detecção de desníveis representa o maior problema de todos.

A maior fonte de atraso provém do filtro IIR. O valor elevado atribuído ao coeficiente α torna o sistema bastante robusto contra falhas de eco, mas em contrapartida torna a transformação do sinal bastante lenta. Na Figura 5.3 encontram-se representadas cinco janelas que ilustram a evolução do sinal à saída de $I(Z)$. Nesta observa-se inicialmente um pico correspondente à distância h_1 e, após a passagem sobre o degrau, o aparecimento gradual de um segundo pico correspondente à distância h_2 e consequente queda do primeiro. Daqui resulta o atraso do filtro IIR pois, apesar de já se ter dado a transição para uma superfície mais distante, só quando a amplitude do segundo pico ultrapassa a do primeiro é que a nova distância é reconhecida. O atraso torna-se tanto maior quanto maior for a discrepância entre as amplitudes dos sinais nas duas superfícies, tornando-se por isso impossível prever qual será ao certo o atraso do sistema.

O método de detecção de buracos através da derivada da amplitude também poderá não ser totalmente fiável. Quando ocorre a passagem para um buraco, o valor atingido pelo sinal d_2 (derivada da amplitude) depende da amplitude do sinal antes do buraco. Se esta não for suficientemente elevada, d_2 poderá não atingir o limiar t_2 , falhando então a detecção do buraco.

5.2 Desenvolvimento do novo algoritmo

O desenvolvimento do novo algoritmo iniciou-se a partir do descrito anteriormente, tentando contornar os seus problemas. Diversos métodos foram experimentados, mas sem nunca obter melhorias satisfatórias. Tornou-se então claro que o filtro IIR teria que ser removido.

É importante referenciar agora a existência de acoplamento directo de sinal entre o emissor e os receptores, factor que dificulta imenso a concepção do algoritmo de detecção de desníveis.

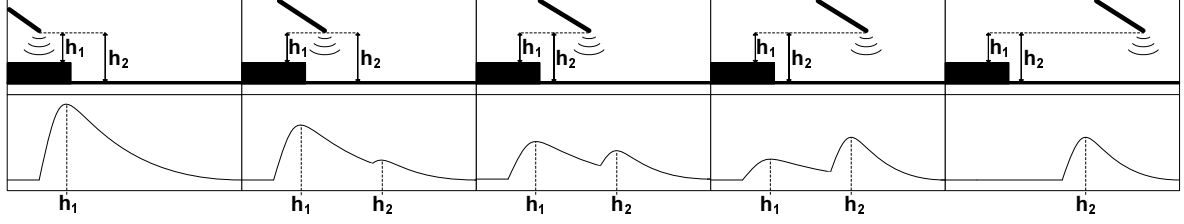


Figura 5.3: Evolução do sinal filtrado aquando da passagem sobre um degrau.

Este acoplamento é acústico e dá-se pelo ar e por vias mecânicas. É extremamente complicado eliminar o seu efeito em todos os receptores, sendo essa a razão pela qual, a partir deste ponto, terem sido utilizados apenas dois receptores no desenvolvimento do sistema. No Apêndice D encontram-se informações mais detalhadas sobre o acoplamento directo e os problemas causados por este.

5.2.1 Como contornar as falhas de eco/Detecção de buracos profundos

Sem o filtro IIR, voltaram a aparecer as amostras sem eco, devido às interferências destrutivas em superfícies irregulares. Foi então necessário descortinar outra forma de tornar o sistema imune a estas falhas.

De forma a proteger o sistema contra falhas de eco, foi essencial criar uma distinção entre o que é um eco, e o que é apenas ruído. Para esse efeito, foi realizada uma aquisição com 5000 pulsos, sem obstáculos em frente dos transdutores, obtendo-se assim um sinal constituído apenas por ruído. A partir destes dados pretendia-se determinar a energia da envolvente de cada pulso em cada receptor, dada por:

$$\varepsilon_x = \sum_{i=0}^{29} |x_i|^2 \quad (5.4)$$

No entanto, estes cálculos seriam demasiado pesados para o microcontrolador (que não possui multiplicador), sendo por isso necessário tomar outra abordagem. Em vez de calcular a energia, e uma vez que $x_i \geq 0$ (envolvente), é calculado simplesmente o somatório de todas as amostras, dado por:

$$F_x = \sum_{i=0}^{29} x_i \quad (5.5)$$

o qual será referenciado daqui em diante como “força” do sinal. Realizando esta operação sobre a aquisição realizada, obtiveram-se os histogramas com a representação da força de ruído típica para cada receptor (Figura 5.4). A média (E) e desvio padrão (σ) do receptor 0 é 50.4 e 4.4, respectivamente, e a do receptor 1 é 53.3 e 4.0. De forma a assegurar um limiar de decisão entre ruído e eco seguro, atribuiu-se a este o valor correspondente a $E + 5 \times \sigma$, que equivale a 72 no caso do receptor 0 e a 73 no receptor 1. Na aquisição realizada registou-se apenas um caso superior ao limiar, no receptor 0. Um dado igualmente importante, que será usado na detecção de desníveis, consiste na amplitude máxima atingida pelo ruído. No caso do receptor 0 foi 11 e no receptor 1, 10.

Para quantificar as falhas de eco que ocorrem nas superfícies mais comuns, era necessário realizar aquisições exaustivas nas mesmas. Como a plataforma de testes possuía um percurso

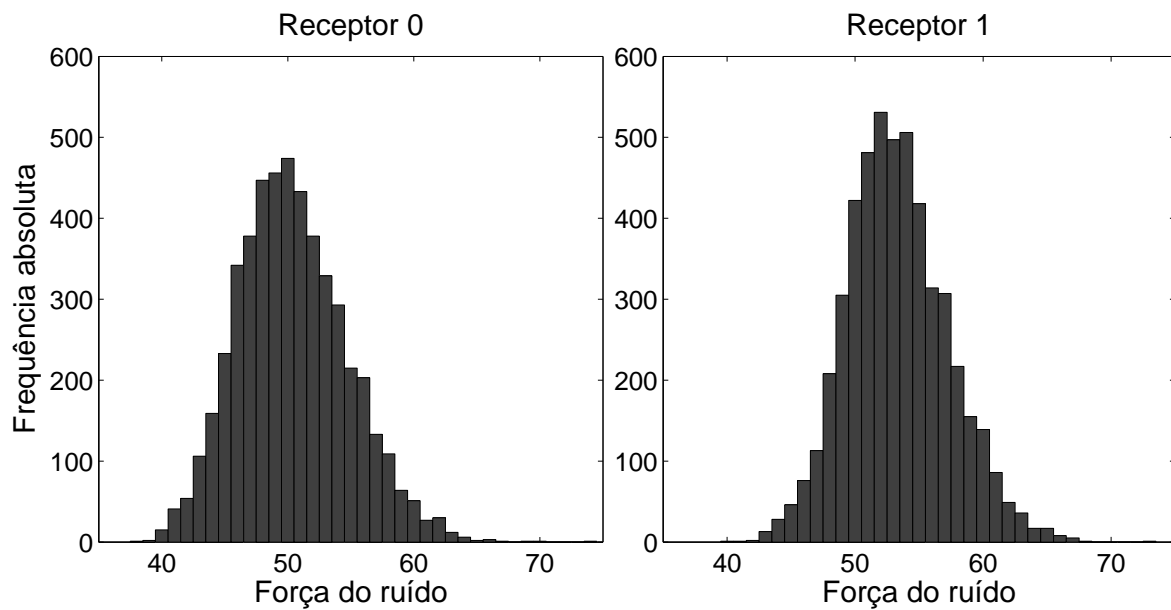


Figura 5.4: Força do ruído típica em cada receptor.

demasiado limitado para esse efeito, retirou-se o PCB da plataforma e adaptou-se a uma bengala provisória para aquisição de dados na rua (Figura 5.5). Realizaram-se então aquisições de vários milhares de pulsos em diversos pisos, tais como linóleo, tijoleira, calçada, alcatrão, relva, terra batida, entre outros.

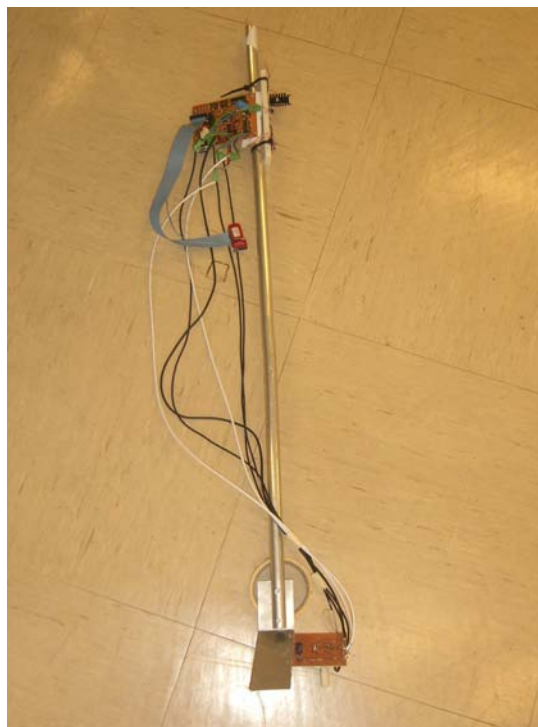


Figura 5.5: Montagem para aquisição de dados na rua.

No caso da calçada, que é um dos pisos mais comuns no nosso país, verificou-se que o número de falhas em simultâneo nos dois receptores não passou além de quatro, que neste caso ($f_{pulso} = 100Hz$) corresponde a $40ms$ sem eco. No entanto, estes resultados são para a situação em que a bengala é mantida até cerca de $30cm$ do solo, pois caso ultrapasse esta altura, os resultados pioram. Os histogramas presentes na Figura 5.6 demonstram bem a melhoria introduzida pelo uso de mais do que um receptor. Como se observa, um receptor a trabalhar individualmente pode apresentar muitas falhas de eco consecutivas. No entanto, ao combinar os resultados de ambos os sensores, o número de falhas é bastante reduzido, bem como o número de falhas consecutivas.

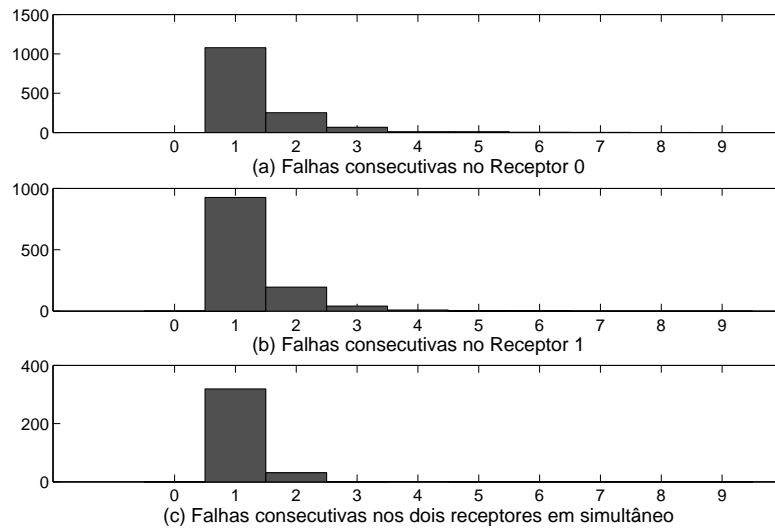


Figura 5.6: Falhas de eco consecutivas nos dois receptores durante a aquisição sobre calçada portuguesa.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os resultados obtidos para as diversas superfícies testadas. Apesar de os resultados se apresentarem piores em superfícies como a alcatifa, relva e terra batida, estas não são tão habituais nos percursos da via pública. De entre as mais comuns, a calçada é aquela que apresenta piores resultados. Se o algoritmo for imune às falhas de eco nesta superfície, estará preparado para enfrentar qualquer outra. Como o número máximo de falhas consecutivas que ocorreram na calçada foram quatro, basta estabelecer um número superior a esse, a partir do qual deverá ser considerado um buraco profundo. Se esse limiar for 6, o sistema demorará sempre $60ms$ a alertar a presença de um buraco, o que corresponde a $9cm$ de atraso a uma velocidade de deslocação de $1.5m/s$. Este método de detecção de buracos substitui o da versão anterior (pela derivada da amplitude) e funciona sempre de igual forma, independentemente da amplitude do sinal. Apesar dos resultados se apresentarem favoráveis, neste ponto ainda não estava determinada qual a frequência de pulso que iria ser utilizada na versão final. Foi, portanto, necessário repetir as aquisições nas diversas superfícies com uma frequência de pulso superior, de maneira a perceber qual a influência desta a nível de falhas de eco. Ajustou-se então a frequência para $150Hz$ e repetiram-se as aquisições, obtendo-se assim os resultados da Tabela 5.2. Como se pode observar, os resultados não sofrem alterações significativas em termos de percentagem de amostras sem eco. Isto é de extrema importância, já que se em termos de amostras os resultados são semelhantes, em

Superfície	Receptor 0		Receptor 1		Ambos Receptores	
	Nº falhas (%)	Consecutivas (máx.)	Nº falhas (%)	Consecutivas (máx.)	Nº falhas (%)	Consecutivas (máx.)
Alcatifa	92.39	498	99.25	681	91.86	352
Relva	38.30	14	46.72	17	19.77	11
Terra batida	30.73	15	34.95	15	13.54	13
Gravilha	23.60	7	27.29	8	7.28	5
Calçada	17.57	8	13.55	6	3.42	4
Paralelo	10.58	4	13.49	5	1.62	2
Alcatrão	2.50	4	3.14	3	0.18	1
Tijoleira	0.14	2	0.11	2	0.03	1
Linóleo	0	0	0	0	0	0

Tabela 5.1: Registo das falhas de eco em diferentes superfícies ($f_{pulso} = 100Hz$).

termos de tempo melhoram muito. Note-se que para manter um tempo de resposta idêntico ao anterior (60ms), serão necessárias 9 amostras sem eco, mais 3 do que no caso em que $f_{pulso} = 100Hz$. Assim, a margem de segurança oferecida pelo limiar de decisão é maior, tornando o sistema mais imune a falsos positivos.

Superfície	Receptor 0		Receptor 1		Ambos Receptores	
	Nº falhas (%)	Consecutivas (máx.)	Nº falhas (%)	Consecutivas (máx.)	Nº falhas (%)	Consecutivas (máx.)
Alcatifa	94.62	719	99.75	1111	94.40	475
Relva	39.65	16	46.86	25	20.53	11
Terra batida	27.52	28	32.70	19	10.60	11
Gravilha	26.70	12	31.16	10	9.11	7
Calçada	11.83	6	14.58	5	1.79	2
Paralelo	10.29	4	12.71	8	1.42	2
Alcatrão	1.35	2	1.71	3	0.07	1
Tijoleira	0.08	2	0.12	1	0	0
Linóleo	0	0	0	0	0	0

Tabela 5.2: Registo das falhas de eco em diferentes superfícies ($f_{pulso} = 150Hz$).

5.2.2 Detecção de degraus

Com o filtro IIR fora do caminho e a componente de detecção de buracos profundos pronta, passou-se então ao desenvolvimento da detecção de desníveis com distâncias mensuráveis.

Testes iniciais em dados adquiridos

Para iniciar o desenvolvimento do algoritmo, recorreram-se às aquisições realizadas previamente, com o intuito de compreender o comportamento dos sinais sem a presença do filtro

IIR. Como primeiro teste, foi determinada a posição do pico da envolvente de cada pulso em todas as aquisições, gerando o sinal p para cada uma delas. Nos pulsos sem eco, assumiu-se que a posição era igual à última medida. Como a distância ao solo é proporcional ao sinal p , é desnecessário calculá-la, podendo todos os cálculos ser realizados directamente sobre p , diminuindo o número de operações efectuadas. Por esta razão, e para facilitar a compreensão do texto, a distância ao solo e o sinal p terão o mesmo significado daqui em diante. Foi então aplicado o filtro $F(Z)$ no sinal p , de maneira a comparar a resposta entre sinais com desníveis e outros sem. Na Tabela 5.3 encontram-se os resultados obtidos para algumas das aquisições realizadas. Os valores atingidos pela derivada da distância em superfícies planas são provenientes da oscilação natural da bengala e de pequenas irregularidades no solo. Como se observa, no caso das superfícies mais comuns, esses valores ficam aquém daqueles que se obtêm na presença de degraus superiores a $5cm$, comprovando assim a viabilidade deste método.

Aquisição em desníveis		Aquisição sem desníveis	
Descrição do desnível	Resposta de $F(Z)$ (derivada)	Tipo de Superfície	Resposta de $F(Z)$ (derivada)
Degrau com $4cm$	12	Linóleo	7
Degrau com $5cm$	17	Tijoleira	8
Degrau com $5cm$	15	Paralelo	9
Degrau com $6cm$	17	Alcatifa	10 (sem significado)
Degrau com $6cm$	20	Terra batida	10
Degrau com $8cm$	24	Calçada	11
Degrau com $14cm$	40	Alcatrão	11
Rampa com 20%	≈ 5 constante	Gravilha	12
Rampa com 50%	≈ 10 constante	Relva	15

Tabela 5.3: Derivadas da distância em diversas situações distintas ($f_{pulso} = 100Hz$).

Tendo sido obtidos resultados favoráveis, passou-se então à afinação de diversos parâmetros de forma a tornar a detecção de desníveis rápida e fiável.

Efeito da frequência de amostragem

A frequência de amostragem (f_a) utilizada até então para adquirir as 30 amostras de cada pulso foi $10kHz$, o que oferece uma resolução espacial de $1.7cm$, com alcance máximo de $50cm$. No caso em que a posição ocupada pelo máximo do eco se encontre entre duas amostras sucessivas, a distância pode oscilar entre as duas posições correspondentes às amostras que abrangem o máximo. Ora se a resolução é de $1.7cm$, a altura mínima detectável nunca poderá ser inferior a $3.4cm$. Para piorar a situação, existe ainda a oscilação natural da bengala (que não deve accionar o alarme), que vai inflacionar ainda mais a distância mínima detectável. Com o intuito de diminuir esta limitação, aumentou-se a frequência de amostragem e, consequentemente, a resolução espacial. Como os testes realizados anteriormente mostraram que a percentagem de falhas no eco se torna demasiado alta acima de $30cm$, tornou-se óbvio que um alcance de $50cm$ era desnecessário. Reduziu-se então o alcance máximo para $35cm$, mantendo a janela de 30 amostras para cada pulso. Recorrendo à equação 4.3 sabe-se que a janela de 30 amostras deve ter a duração de $2ms$. Senso assim, a frequência de amostragem é de $15kHz$ (período de $67\mu s$) e a resolução espacial passa a ser $1.2cm$.

Efeito da frequência de pulso

A frequência de pulso (f_{pulso}) não tem um efeito na derivada da distância tão marcante quanto o da frequência de amostragem. No entanto, quanto maior for f_{pulso} , mais suave se torna o sinal p em mudanças de distância graduais. Por outro lado, a forma do sinal p em transições bruscas (como no caso de um degrau) mantém-se idêntica. Isto provoca um aumento na discrepância da derivada da distância dada entre superfícies planas e degraus, diminuindo assim a probabilidade de detecção de desníveis inexistentes.

Como a detecção de desníveis apenas contempla os últimos N pulsos, sendo que N é igual ao número de coeficientes do filtro FIR, o intervalo de tempo associado é fixo e é dado por N/f_{pulso} . Caso se aumente f_{pulso} e se mantenha o intervalo de tempo constante, N poderá aumentar em igual proporção. Com o aumento da ordem do filtro FIR, este torna-se mais eficiente a filtrar ruído.

Foi visto na secção 5.2.1 que a partir de $f_{pulso} = 150Hz$ é possível detectar buracos profundos de forma rápida e fiável. Por esta razão, decidiu-se utilizar essa frequência no desenvolvimento do algoritmo de detecção de desníveis.

O novo filtro diferenciador

Tendo em conta que para $f_{pulso} = 150Hz$, um atraso de $60ms$ oferece uma boa margem de segurança na detecção de buracos profundos, utilizou-se um filtro FIR que garanta um atraso máximo não superior a esse valor. A resposta ao impulso deste encontra-se representada na Figura 5.7(a). Mais uma vez, este resulta da convolução de um filtro passa-baixo com um diferenciador. O filtro passa-baixo foi dimensionado com ordem 9 de maneira a obter uma amplitude máxima ao fim de $60ms$, quando na presença de um degrau (Figura 5.7(b)).

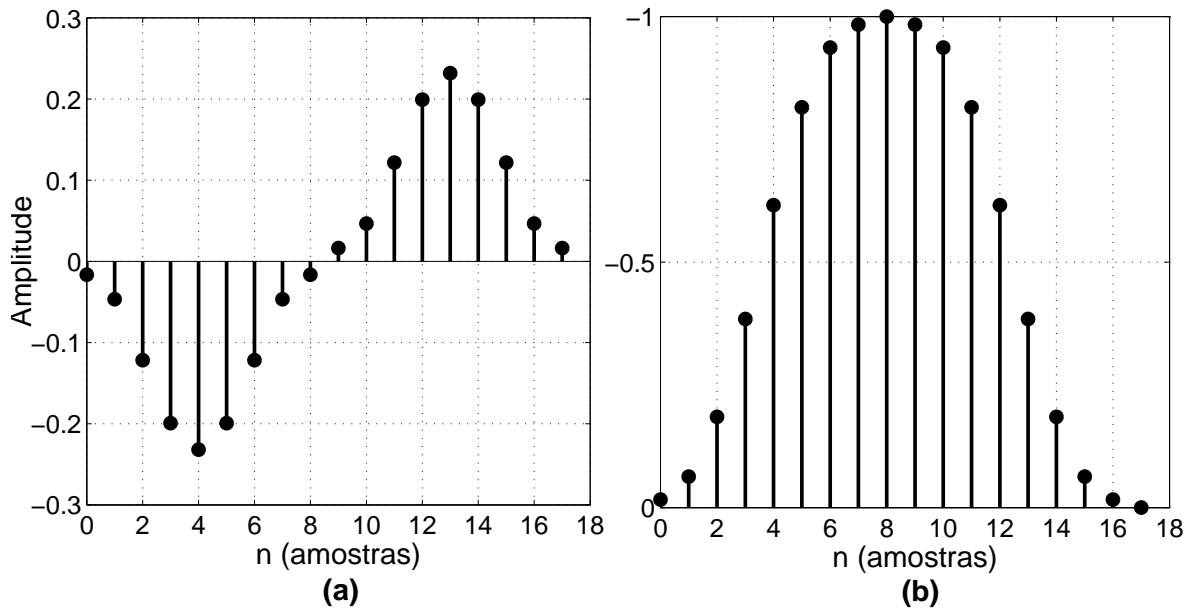


Figura 5.7: Filtro FIR: (a) Resposta a um impulso unitário; (b) Resposta a um degrau unitário.

Este filtro possui consideravelmente mais coeficientes do que aquele usado anteriormente e o cálculo da sua resposta terá que ser realizado em vírgula flutuante, o que se pode tornar bas-

tante pesado para o microcontrolador. No entanto, foi utilizada uma forma bastante eficiente de realizar estas operações. Observando a Figura 5.7(a), verifica-se que o filtro apresenta uma simetria inversa e, em cada metade, existe ainda outro eixo de simetria. Sabendo que a resposta do filtro é dada por:

$$d[n] = \sum_{i=0}^N h_i \times p[N-i] \quad (5.6)$$

sendo N a ordem do filtro (17), h_i os seus coeficientes e p as últimas N amostras do sinal de entrada; como:

$$\begin{aligned} h_0 &= h_8 = -h_9 = -h_{17} \\ h_1 &= h_7 = -h_{10} = -h_{16} \\ &\vdots \\ h_4 &= -h_{13} \end{aligned}$$

pode-se aplicar a propriedade distributiva da multiplicação, obtendo-se:

$$d[n] = h_0(p[17] + p[9] - p[8] - p[0]) + h_1(\dots) + \dots + h_4(p[13] + p[4]) \quad (5.7)$$

Desta forma reduziu-se o número de multiplicações para 1/4 (arredondado por excesso), tornando esta operação bastante mais leve para o microcontrolador.

Testes com os novos parâmetros

Depois de estabelecidos os novos parâmetros do sistema, realizaram-se novas aquisições de maneira a verificar melhorias no desempenho do sistema. Na Tabela 5.4 encontram-se representados os resultados obtidos. Como se pode observar, passou a ser possível reconhecer um degrau de 4cm (comparando com as superfícies mais comuns) e, em termos relativos, a margem de segurança para o reconhecimento de um degrau superior a 5cm aumentou. Se por um lado a detecção de degraus tornou-se mais eficaz, a detecção de rampas tornou-se mais difícil. Contudo, este facto significa também que o sistema se tornou mais imune às oscilações verticais da bengala.

Os resultados para algumas superfícies aparentam ser contraditórios, como é o caso do paralelo. Este tipo de superfície, apesar de ser das mais irregulares, apresentou um resultado idêntico ao do linóleo e melhor do que tijoleira lisa. Isto deve-se ao facto de os valores obtidos resultarem essencialmente da oscilação vertical da bengala, tendo as pequenas irregularidades das superfícies pouco efeito na resposta do sistema. O facto de se ter obtido piores resultados na tijoleira significa que ocorreram movimentos mais bruscos na realização dessa experiência do que naquela realizada sobre paralelo. Este é um grande inconveniente que será abordado na secção 5.2.4

5.2.3 O algoritmo completo

Depois de estar estabelecido o funcionamento das partes fulcrais do algoritmo, restou apenas interligá-las. Na Figura 5.8 é apresentado o diagrama que ilustra a interligação entre todos os processos constituintes do algoritmo e qual a abordagem feita a cada novo pulso recebido. Como se pode observar, esta é uma versão bem mais simplista do que aquela

Aquisição em desníveis		Aquisição sem desníveis	
Descrição do desnível	Resposta de $F(Z)$ (derivada)	Tipo de Superfície	Resposta de $F(Z)$ (derivada)
Degrau com 4cm	3.32	Linóleo	1.98
Degrau com 5cm	4.43	Alcatrão	1.98
Degrau com 5cm	4.31	Paralelo	1.99
Degrau com 6cm	4.80	Tijoleira	2.37
Degrau com 6cm	5.30	Terra batida	2.90
Degrau com 8cm	6.98	Alcatifa	3 (sem significado)
Degrau com 14cm	11.94	Calçada	3.16
Rampa com 20%	≈ 1.54 constante	Gravilha	3.59
Rampa com 50%	≈ 1.02 constante	Relva	4.88

Tabela 5.4: Derivadas da distância em diversas situações (usando os novos parâmetros).

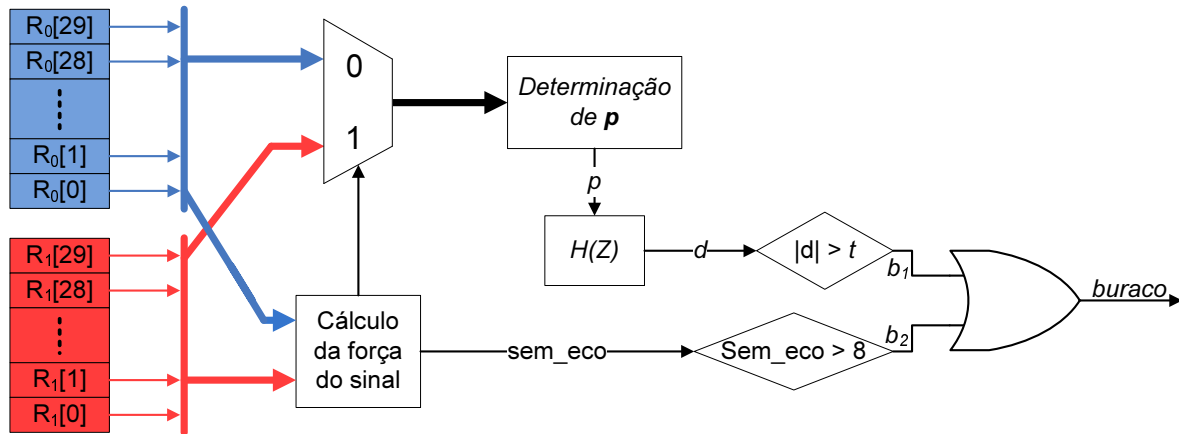


Figura 5.8: Diagrama de blocos ilustrativo do tratamento dado às amostras de cada pulso recebido (versão actual).

desenvolvida anteriormente, deixando uma grande margem para progressão e facilitando a sua compreensão para um contínuo desenvolvimento.

Passando agora à descrição do algoritmo propriamente dito: o tratamento de um pulso começa com a aquisição de uma janela de 30 amostras para cada receptor. A partir destas, o programa calcula a força de sinal em cada receptor, decidindo se o sinal constitui um eco ou apenas ruído. Caso seja apenas ruído, é incrementada a variável *sem_eco*, sendo assinalado um buraco se não for detectado nenhum eco durante 9 pulsos consecutivos. Se for detectado eco nos dois receptores, é calculada a média dos dois pulsos, permitindo assim uma redução no ruído. No entanto, caso seja detectado eco apenas num dos receptores, será processado apenas o pulso que contém o eco, descartando-se o outro. Este método foi escolhido em detrimento do cálculo da média, pois pulsos que contivessem apenas ruído, iriam simplesmente diminuir a amplitude dos ecos, podendo mesmo torná-los imperceptíveis. Após a decisão de qual o sinal a ser processado, é determinada a distância ao solo, p . Caso não tenha sido recebido pulso, ou a amplitude do pico não for superior à amplitude máxima atingível pelo ruído (medida na secção 5.2.1), assume-se que a distância permanece igual à amostra anterior. A derivada da

distância é então obtida através do filtro FIR, $H(Z)$, e caso seja superior ao limiar de decisão t , será assinalada a presença de um desnível. Atribuiu-se o valor 4 a t , permitindo a detecção de degraus com uma altura mínima de aproximadamente $5cm$.

5.2.4 Problemas no algoritmo

Ao longo do desenvolvimento deste novo algoritmo, foram sendo detectadas certas condições susceptíveis de afectar o bom desempenho do sistema. Em seguida vão ser descritos os principais problemas encontrados e uma proposta para os solucionar.

Oscilação natural da bengala

Para a oscilação natural da bengala não ser detectada como um desnível, foi necessário ignorar desníveis inferiores a $5cm$ o que, apesar de ser menos que na versão anterior, poderá ocultar desníveis mais pequenos, mas igualmente perigosos. As rampas, apesar de poderem representar o mesmo grau de perigo que os degraus, são igualmente desprezadas pelo algoritmo, independentemente da sua altura. Uma solução possível para contornar este problema passará por introduzir um acelerómetro vertical na bengala. Se o movimento descrito pela bengala for reconhecido, poderá ser compensado na medida da distância. Desta forma, para uma superfície lisa, o sinal d manter-se-á nulo independentemente do movimento descrito pela bengala, acusando apenas as irregularidades existentes na superfície. Com este método, a altura mínima de um desnível reconhecível seria apenas limitada pela resolução espacial escolhida.

Ecoss duplicados

Por vezes, o eco que chega aos transdutores é novamente reflectido na estrutura que os suporta, possibilitando o aparecimento de ecos duplicados. Devido a interferências, é possível que apareça um segundo eco superior ao primeiro (Figura 5.9). Isto leva o algoritmo a detectar uma falsa mudança de posição brusca, podendo alertar erradamente para a presença de um desnível.

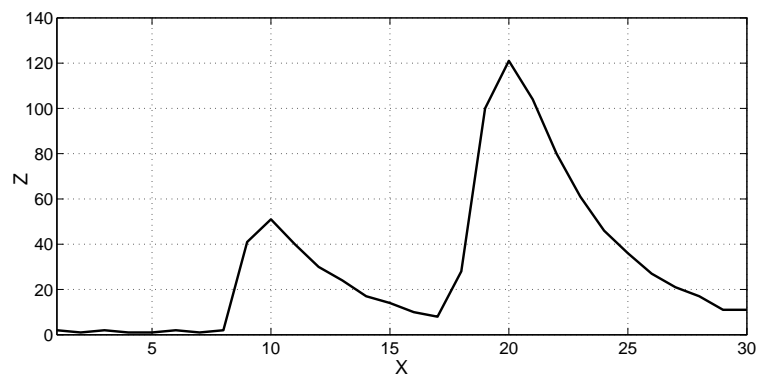


Figura 5.9: Exemplo ilustrativo de um pulso em que o segundo eco suplantou o primeiro.

Duas soluções foram encontradas e implementadas para mitigar este problema. A primeira consistiu em envolver a estrutura de suporte dos transdutores em esponja. Este material

atenua muito o sinal reflectido, impedindo que a maior parte dos pulsos volte a ser enviado para a superfície.

A segunda, já a nível de software, consistiu em alterar o método de determinação da posição p . Anteriormente, esta era efectuada procurando o máximo absoluto de cada janela e registando a posição associada. Com este método, é procurado o primeiro máximo relativo (através de um filtro diferenciador de primeira ordem), ignorando todos os outros, independentemente da sua amplitude. Na Figura 5.10 vê-se esta solução em acção, ignorando por três vezes o duplo eco que o antigo não foi capaz. Apesar desta forma funcionar bem no

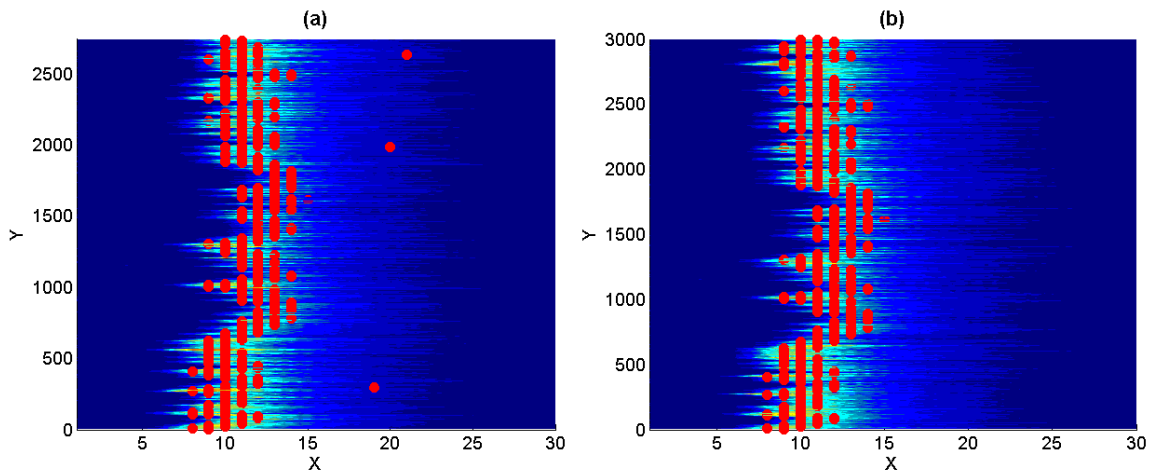


Figura 5.10: Métodos distintos para determinar p . Em (a) é utilizada a posição do máximo absoluto e em (b) a do primeiro máximo relativo. Os círculos vermelhos marcam a posição determinada em cada pulso.

caso de duplos ecos, torna-se mais susceptível a erros quando na presença de elevado ruído nas primeiras amostras da janela, proveniente nomeadamente de acoplamento directo de sinal entre os transdutores e colisões mecânicas.

Como a primeira solução apresentou um bom desempenho, optou-se por continuar a determinar a distância pelo máximo absoluto de cada janela, já que as colisões da bengala com obstáculos são inevitáveis e necessárias, podendo conduzir a muitos falsos positivos.

Superfícies hostis

Apesar de nas superfícies mais usuais o sistema funcionar correctamente, existem outras para as quais o algoritmo não está preparado, detectando desníveis inexistentes e diminuindo por isso a confiança do utilizador no equipamento. Se numas o problema prende-se com a fraca reflexão de sinal, e.g. alcatifa, noutras prende-se com a sua elevada irregularidade, e.g. relva.

No caso da falta de reflexão, o problema será fortemente reduzido se for realizada uma amostragem de segunda ordem do sinal amplificado, sem realizar a detecção da envolvente. Como já foi mostrado anteriormente, o circuito utilizado na detecção da envolvente ignora todos os sinais inferiores a $0.5V$, perdendo-se assim muitos ecos. Este efeito pode-se verificar na Figura 5.11, na qual estão representados histogramas da energia dos pulsos em quatro superfícies distintas. Como se verifica, a energia apresenta um comportamento aproximada-

mente Gaussianano. No entanto, no caso da calçada e da relva (onde ocorrem muitas falhas de eco), existem duas médias. A média inferior não é mais do que a soma de todos os ecos que não superaram a “barreira” dos 0.5V imposta pelo circuito de detecção da envolvente. Fica assim demonstrada a ineficiência que este circuito traz ao sistema e o porquê de ser vivamente recomendado o uso de uma amostragem de segunda ordem em desenvolvimentos futuros.

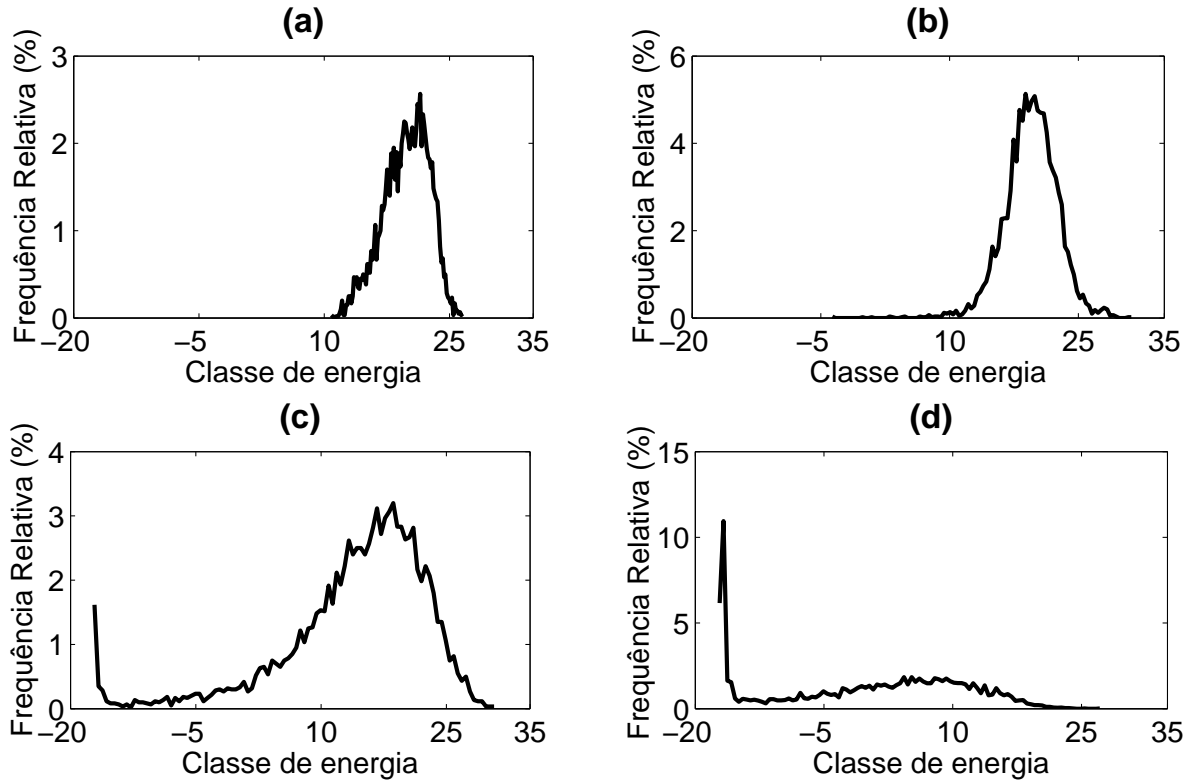


Figura 5.11: Histogramas da energia dos pulsos em superfícies distintas: (a) linóleo; (b) tijoleira; (c) calçada; (d) relva.

Relativamente às superfícies muito irregulares, já foi explicado anteriormente que o uso de um acelerómetro poderá melhorar o desempenho da bengala. Contudo, atentando mais uma vez à Figura 5.11, observa-se um aumento claro da variância da energia dos pulsos para superfícies mais irregulares. Já na Figura 5.12 é possível verificar uma dependência da energia dos pulsos com a distância à superfície. Estes dados mostram que pode ser criada uma relação entre a energia dos pulsos e a superfície associada. Se esta informação for calculada e processada em tempo-real, o sistema poderá reajustar automaticamente os limiares de decisão, adaptando-os da melhor forma ao tipo de superfície que está a sondar.

5.3 Algoritmo 2009 vs. Algoritmo 2008

Para demonstrar as melhorias alcançadas com este novo algoritmo, realizaram-se uma série de ensaios na plataforma de testes, simulando vários desníveis. Os dados recolhidos foram processados com ambas as versões do algoritmo, resultando nos valores apresentados na Tabela 5.5.

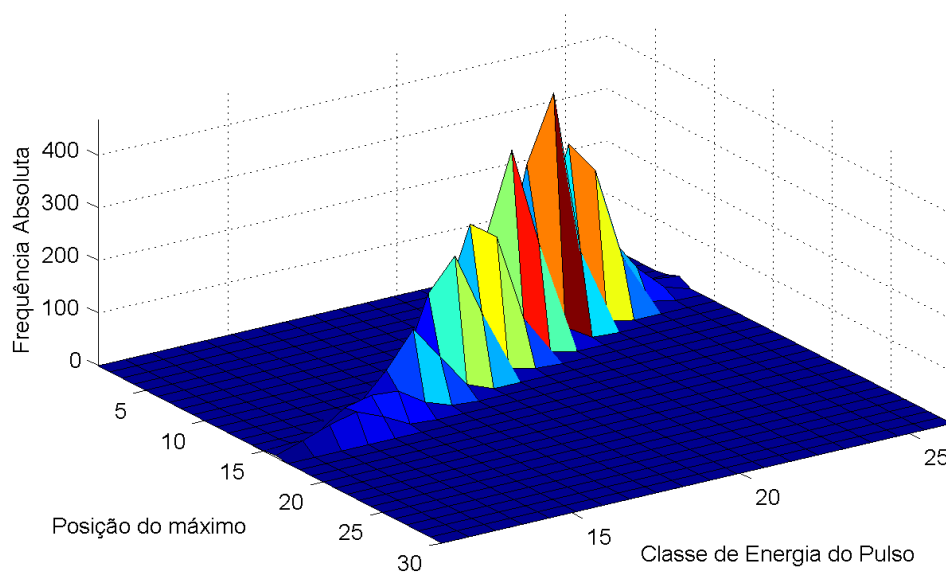


Figura 5.12: Histogramas da energia dos pulsos em função da distância ao solo.

Ensaio	Descrição do desnível	Algoritmo 2008		Algoritmo 2009	
		Atraso (amostras)	Atraso (ms)	Atraso (amostras)	Atraso (ms)
1	Degrau (a descer) de 4cm	-	-	-	-
2	Degrau (a descer) de 5cm	-	-	8	53
3	Degrau (a descer) de 6cm	-	-	8	53
4	Degrau (a descer) de 7cm	14	84	7	47
5	Degrau (a descer) de 8cm	13	78	6	40
6	Degrau (a subir) de 8cm	8	48	6	40
7	Degrau (a descer) de 8cm (1ª superfície reflecte mal o sinal)	9	54	7	47
8	Degrau (a descer) de 14cm	21	127	5	33
9	Degrau (a subir) de 14cm	6	36	4	27
10	Degrau (a descer) de 14cm (1ª superfície reflecte mal o sinal)	12	72	6	40
11	Superfície a 10cm para o buraco	6	36	9	60
12	Superfície a 18cm para o buraco	-	-	9	60

Tabela 5.5: Comparação do atraso na detecção de desníveis por parte de ambas as versões do algoritmo.

Dos resultados obtidos, é necessário salientar algumas melhorias importantes:

- A altura mínima detectável diminuiu cerca de 2cm;
- O atraso passou a ser completamente independente da amplitude do sinal devolvido pelas superfícies que se encontram antes e depois do desnível. Este facto observa-se

entre degraus a descer e a subir, e na passagem entre superfícies com propriedades reflectoras distintas (ensaios 7 e 10);

- O tempo de atraso na versão antiga era muito inconstante, obtendo-se numas vezes tempos muito bons, e.g. ensaios 6 e 9, e noutras, tempos muito maus, e.g. ensaio 8. Por sua vez, na nova versão verifica-se que o atraso obtido experimentalmente nunca supera o máximo estabelecido no seu desenvolvimento ($60ms$);
- Para buracos profundos, a versão antiga apresentou potencial para ser mais rápida (ensaio 11). Contudo, os buracos nem sempre são detectados (ensaio 12), ao passo que o novo algoritmo detecta-os sempre num tempo fixo de $60ms$;
- O potencial da nova versão observa-se melhor no atraso em amostras, já que no domínio do tempo, a versão antiga tem a vantagem de utilizar uma frequência de pulso superior.

Tendo sido obtidos resultados tão promissores, restava apenas implementar o algoritmo desenvolvido num protótipo para testar o seu desempenho em situações reais.

Capítulo 6

Novo protótipo da bengala

Para o algoritmo desenvolvido poder ser testado no terreno, era necessário implementá-lo num protótipo prático. Uma opção seria o que foi construído em 2008, no entanto este não apresentava comodidade suficiente já que era muito pesado e o hardware tinha que ser transportado numa caixa à parte. Optou-se então pela construção de um novo protótipo de raiz.

6.1 Hardware

Na Figura 6.1 encontra-se representado o diagrama de blocos do hardware utilizado neste novo protótipo. Tanto o esquema do circuito como o layout do PCB são apresentados na íntegra nos Apêndices B e C, respectivamente.

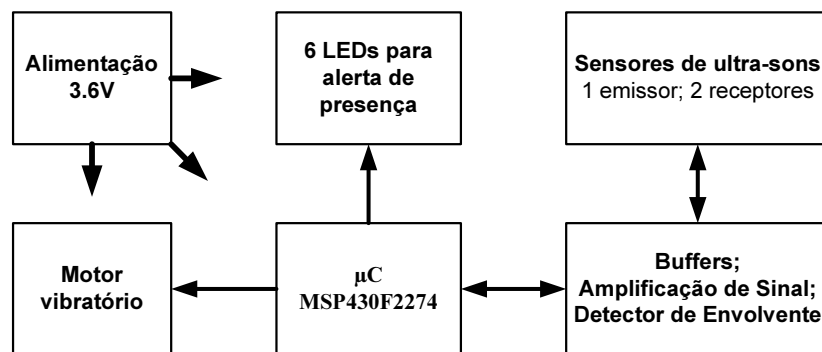


Figura 6.1: Diagrama de blocos do hardware implementado na nova versão do protótipo da bengala.

Do circuito utilizado na plataforma de testes, foi mantido o microcontrolador, acondicionamento de sinal e sensores de ultra-sons. O circuito de alimentação teve que se modificar para um uso portátil e foi acrescentado um motor vibratório para alertar o utilizador da presença de desníveis. Apesar de não terem sido inseridos no protótipo os LEDs para alerta de presença do utilizador em espaços escuros, foi implementado o circuito para activação dos mesmos. Foram ainda inseridos dois LEDs e um botão de pressão para efeitos de debug.

6.1.1 Alimentação

Neste sistema, todo o circuito é alimentado a 3.6V (tensão de operação máxima do micro-controlador). Este aumento (em relação aos 3.3V da plataforma de testes) permite a emissão de ondas de ultra-sons com mais potência, tornando a detecção de desníveis menos susceptível a erros.

Para alimentar o circuito são usadas duas pilhas AAA de NiMH recarregáveis, montadas em série, disponibilizando 2.4V aos seus terminais. A escolha desta fonte prende-se com o seu baixo custo, dimensões reduzidas e possibilidade de recarregamento. Para elevar a tensão para 3.6V recorreu-se ao conversor DC-DC MAX1674 da Maxim. Este dispositivo permite a obtenção de 3.6V estáveis mesmo com uma tensão de entrada tão baixa quanto 0.6V, aumentando assim a longevidade das pilhas.

Apesar de não ter sido implementado, o circuito de alimentação permite ainda a inclusão de um painel solar com uma tensão nominal de 3.6V para alimentar todo o sistema quando na presença de luminosidade suficiente. Este painel tem ainda a vantagem de ir carregando as pilhas, diminuindo o número de vezes que o utilizador tem que se preocupar em carregá-las num dispositivo apropriado. O painel não foi inserido neste protótipo pois a sua viabilidade já tinha sido testada com sucesso na versão anterior. Sendo assim, deixou-se simplesmente o circuito preparado para a sua inclusão caso seja necessário para demonstrações no futuro.

O circuito desenvolvido para o módulo de alimentação encontra-se representado na Figura 6.2. Como se observa, para a inclusão do painel apenas é necessário um diodo que evite que as pilhas descarreguem pelo painel quando em locais escuros. Foi incluído um botão interruptor para o utilizador poder ligar e desligar todo o sistema.

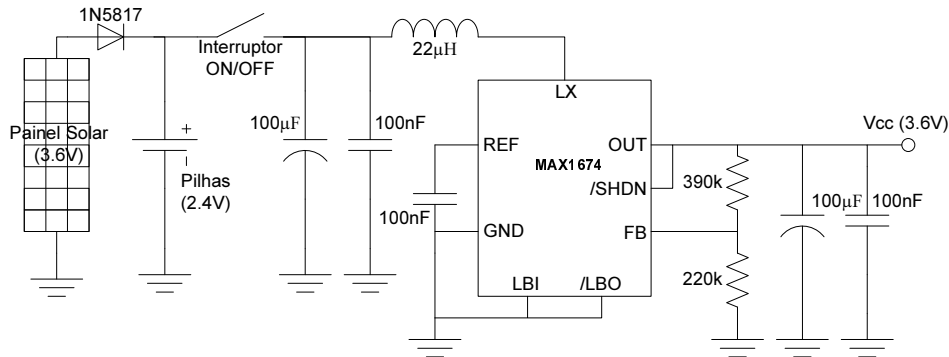


Figura 6.2: Módulo de alimentação do novo protótipo.

6.1.2 Motor vibratório

A vibração da bengala foi o modo escolhido para alertar o utilizador da presença de desníveis. A alternativa seria alertas sonoros, mas estes teriam várias desvantagens, nomeadamente falta de discrição e fraco desempenho em ambientes barulhentos.

A vibração da bengala foi conseguida através de um motor DC vibratório retirado de um telemóvel. Como o sistema deve apresentar um baixo consumo energético, de maneira a aumentar a longevidade das pilhas, vários modelos foram testados até encontrar um motor com uma relação intensidade de vibração/consumo razoável. O motor escolhido apresenta um consumo de 40mA@3V.

O motor utilizado apresenta, contudo, um consumo demasiado elevado relativamente ao resto do sistema. Como alternativa, foi testada uma célula piezoelétrica. Verificou-se que se for encontrada a frequência de ressonância do conjunto mecânico, é possível sentir a bengala a vibrar. No entanto, a vibração que se obteve era demasiado ténue quando comparada com o motor. Este factor pode diminuir o efeito de surpresa provocado pela vibração, podendo aumentar, consequentemente, o tempo de reacção do utilizador. Todavia, se a célula piezoelétrica for colocada em contacto directo com a ponta dos dedos, o efeito é amplamente melhorado.

O uso de uma célula piezoelétrica em detrimento do motor DC iria diminuir substancialmente o consumo geral do sistema. Sendo assim, numa versão futura da bengala, deverá ser encontrada a melhor forma de implementar uma célula piezoelétrica enquanto entidade vibratória.

6.1.3 LEDs para alerta de presença

Como já foi dito, os LEDs para alerta de presença em locais escuros não foram incluídos. Tal como o painel solar, já foram testados com sucesso na versão anterior, não tendo sido por isso dispendido tempo a adaptar ao novo sistema o algoritmo para controlo dos mesmos. Contudo, incluiu-se o hardware necessário para a inclusão dos LEDs, caso seja pretendido para demonstrações no futuro.

O circuito desenvolvido para activação dos LEDs encontra-se representado na Figura 6.3. Como este foi dimensionado para LEDs de alto brilho, que apresentam um consumo superior a LEDs normais, foi inserido um filtro na sua alimentação de forma a impedir que estes insiram ruído no resto do circuito. Como o microcontrolador não possui drive de corrente suficiente, este é obtido a partir de buffers inversores (modelo 74AC04). Os LEDs estão organizados em três pares para serem dispostos lado a lado ao longo da bengala, de forma a incidirem em todos os ângulos.

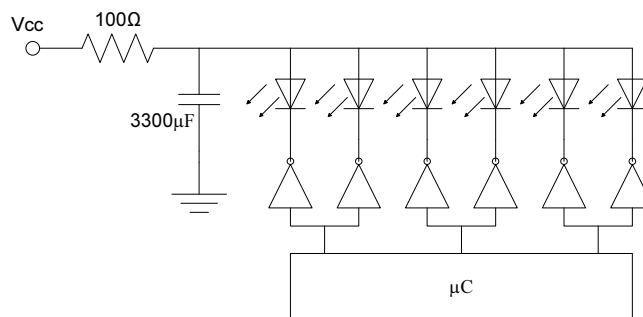


Figura 6.3: Circuito para activação de LEDs de presença.

6.1.4 Montagem mecânica

Com o circuito pronto, restava apenas construir a bengala que o iria acondicionar. Como se pretendia que o protótipo fosse prático e cómodo, sem apetrechos pendurados, inseriu-se o circuito dentro de uma pequena caixa, presa à bengala. Para ligar o circuito com os transdutores, que têm de estar posicionados na extremidade da bengala, foram utilizados cabos coaxiais. Como não é do agrado dos cegos dar nas vistas, os cabos passam pelo interior

oco da bengala, aumentando a discricção da mesma. Para facilitar o manuseamento da bengala foi colocada uma ponta rotativa, da Ambutech, própria das bengalas para cegos. Esta evita que a bengala encrave nas irregularidades do solo, caso o cego a utilize de uma forma mais tradicional.

Não querendo pôr de parte a ideia das varetas laterais (apresentadas no Capítulo 3), estas foram incluídas no protótipo. Desta vez, foram feitas alterações para tentar resolver alguns dos defeitos apontados: foram colocadas mais próximas do chão, paralelas ao mesmo, e a largura abrangida pelo conjunto foi reduzido para 30cm. A inclusão das varetas tem ainda a vantagem de oferecer alguma protecção aos transdutores, evitando que estes sofram pancadas laterais.

O aspecto final do protótipo, bem como as vistas pormenorizadas da ponta e da caixa que alberga o PCB, podem ser visualizados na Figura 6.4.



Figura 6.4: Protótipo da bengala desenvolvido para detecção de desníveis.

6.2 Software

O software implementado na bengala consistiu, em termos latos, em adaptar para linguagem C o algoritmo de detecção de desníveis desenvolvido no Matlab. Contudo, foram tidos cuidados para reduzir ao máximo o consumo energético do microcontrolador. Sempre que possível, este é colocado num estado adormecido de baixo consumo, sendo apenas acordado (através de interrupções dos periféricos) quando é necessário algum processamento. O diagrama de fluxo da Figura 6.5 representa o algoritmo implementado na bengala. Como se observa, quase todo o processo é realizado em modos de baixo consumo, sendo que o algoritmo para detecção de desníveis é o único bloco que foge à regra. Os curtos instantes de tempo nos quais o microcontrolador está em modo activo servem apenas para reconfigurar os registos do timer ou ADC, entrando logo de seguida em baixo consumo esperando que os

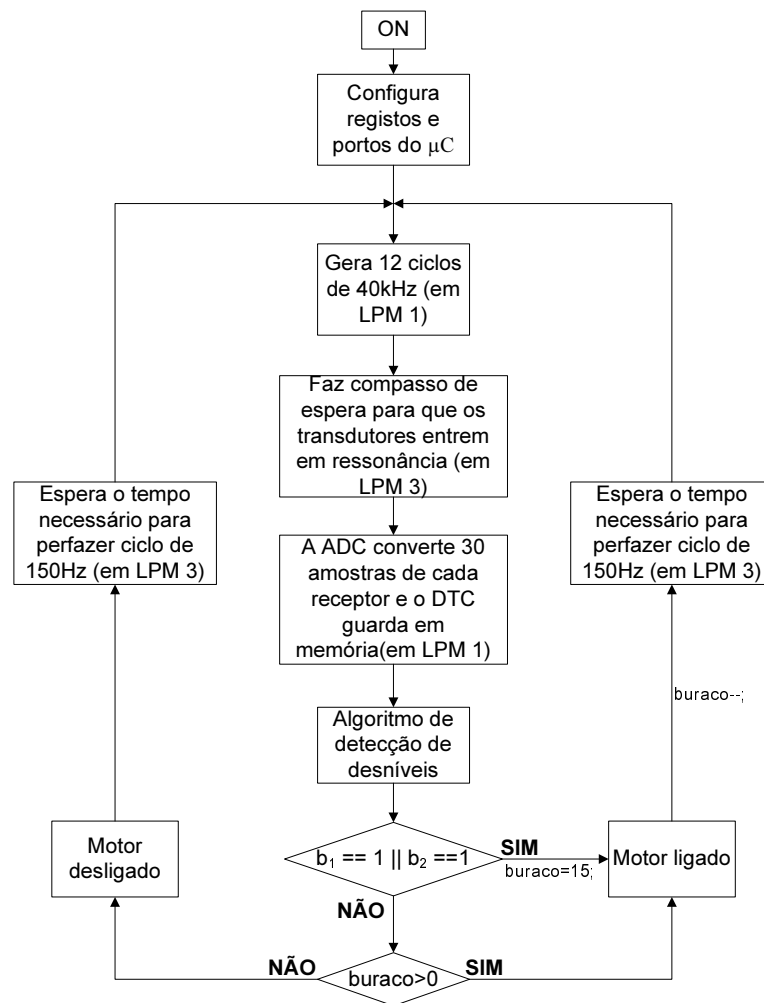


Figura 6.5: Fluxograma do algoritmo implementado na bengala.

periféricos façam o seu trabalho. Sempre que um periférico não é necessário, este é desligado, minimizando o consumo geral do sistema. É necessário salientar o estado de standby (LPM 3), no qual é desligado o relógio principal ($12MHz$), ficando apenas um timer a funcionar com um oscilador de baixa frequência ($\approx 12kHz$), de muito baixo consumo. Na secção seguinte é feita uma análise ao consumo do sistema neste modo de operação.

6.3 Consumo da bengala

O consumo energético da versão final da bengala será um dos pontos fulcrais para o sucesso desta enquanto produto comerciável. Apesar de a versão desenvolvida ao longo deste projecto ainda estar longe da versão final, foram tidos alguns cuidados (essencialmente a nível de software) para minimizar o consumo. Atendendo a que nem todo o hardware utilizado até então é o mais indicado para aplicações de baixo consumo, existe ainda uma grande margem de progresso nesta área. Sendo assim, o consumo do protótipo construído está, com certeza, longe do de uma versão final. No entanto, mediu-se o consumo da versão actual para verificar

se este não atinge valores despropositadamente elevados, oferecendo ainda uma estimativa da autonomia das pilhas.

Para medir o consumo do sistema recorreu-se a um amperímetro em série com as pilhas (Figura 6.6). Como o MAX1674 (conversor DC-DC) mantém a potência fornecida pelas pilhas aproximadamente igual à potência fornecida à carga (eficiência $\approx 94\%$), a relação

$$V_{in} \cdot I_{in} = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{0.94} \quad (6.1)$$

mantém-se constante. Como V_{out} é sempre igual a $3.6V$, a corrente I_{in} aumenta com proporção inversa à diminuição de carga das pilhas (V_{in}). Os consumos são então interpretados em unidades de potência, já que as correntes medidas apenas se verificam para a carga exacta que as pilhas continham no instante de medida.

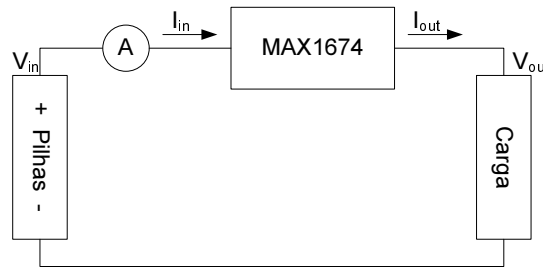


Figura 6.6: Diagrama da montagem realizada para medir o consumo energético do sistema.

Na Tabela 6.1 encontram-se os consumos medidos em diferentes situações de operação. Todas as experiências foram realizadas com os LEDs de debug desligados, já que estes não serão necessários para o utilizador e consomem, em conjunto, várias dezenas de *miliWatt*.

Condições	$P_{in}(mW)$
Sistema sem μC (apenas CI's)	4.6
Sistema completo	15.3
Sistema completo (motor ligado)	295
Sistema completo @ LPM 3	11.7

Tabela 6.1: Consumo do sistema em diversas situações.

Através da consulta dos datasheets dos componentes, estimou-se que a potência consumida pelos CIs poderia ir até $5mW$, o que vai de encontro ao valor medido. Já na presença do μC não foi possível estimar um consumo teórico. As informações fornecidas no datasheet referem-se ao MSP430F2274 isolado, e neste projecto o μC encontrava-se inserido numa placa de desenvolvimento que contém outros módulos externos que aumentam consideravelmente o consumo. No entanto, é possível verificar que o modo de baixo consumo permite poupar uma porção considerável de energia.

Mais uma vez se constatou que o motor vibratório apresenta um consumo desproporcional ao resto do sistema, reforçando a necessidade de encontrar um método alternativo para alertar o utilizador.

Tendo em conta que as pilhas utilizadas possuem em conjunto, $2400mWh$, oferecem uma autonomia de cerca de 6 dias sem vibrações. No entanto, estimando que a bengala está a

vibrar 5% do tempo, a autonomia ronda 3 dias de utilização seguidos. Estes resultados são deveras promissores.

6.4 Testes no terreno

Após o desenvolvimento realizado, restava apenas testar a bengala num cenário real. Fomos então para a rua realizar longas caminhadas sobre várias superfícies para testar a sua viabilidade e, mais tarde, convidámos alguns cegos para a testar. Desta forma, foi possível observar se a bengala construída se adequava às necessidades dos cegos.

6.4.1 Desempenho em diversas superfícies

Para testar a viabilidade da bengala e, de certa forma, quantificar o seu desempenho, realizou-se uma caminhada com a duração de 20 minutos sobre diversas superfícies passíveis de serem encontradas na via pública. A velocidade de marcha foi de aproximadamente $1.2m/s$, o que corresponde a cerca de 1400 metros.

Ao longo do ensaio foram detectados com sucesso todos os degraus e buracos superiores a $5cm$ e, por vezes, alguns de $4cm$. As rampas, tal como era de esperar, não foram detectadas. Quanto a alertas de buracos/desníveis inexistentes, verificou-se que a bengala se comportou como esperado. Não foram detectadas quaisquer falhas nos pisos para os quais foi preparada (calçada, alcatrão, paralelo), e até mesmo em grelhas de escoamento fundas. No entanto, foram detectados alguns falsos alertas noutro tipo de superfícies: duas vezes devido a ervas altas na superfície, uma vez numa grelha de barras finas, uma vez em terra batida irregular e repetidamente em relva e em grelhas de escoamento baixas.

6.4.2 Apreciação dos cegos

Alguns cegos deslocaram-se até ao Departamento de Electrónica da Universidade de Aveiro com o intuito de experimentar a bengala e opinar sobre a mesma (Figura 6.7). Após algumas caminhadas puderam oferecer a sua opinião que, de um modo geral, foi bastante encorajadora.

Tal como tinha sido verificado anteriormente, a detecção de degraus e desníveis foi realizada sem falhas e atempadamente. Mostrou-se especialmente eficaz em escadas, detectando todos os degraus individualmente, informando claramente o utilizador do começo e fim das mesmas. No entanto, nas mãos dos cegos, ocorreu um maior número de falsos alertas. Por vezes, quando a bengala chocava bruscamente contra obstáculos, alertava um buraco inexistente. Este problema não surgiu nos testes anteriores pois os obstáculos eram evitados. Como os cegos, para além de não conseguirem antecipar os obstáculos, precisam mesmo de ir tacteando a parede para se guiarem, tornou-se evidente que este problema necessitaria de ser resolvido.

Durante a experimentação tornou-se claro que a detecção de degraus a subir é irrelevante, já que a bengala detecta-os ao chocar contra os mesmos. Alterou-se então o algoritmo para deixar de alertar nestas situações e constatou-se que este factor diminui substancialmente o número de falsos alertas devido a embates físicos (teoricamente deve diminuir em cerca de 50%).

Quanto ao tempo de resposta na detecção de desníveis, verificou-se que a bengala permitia alertar o utilizador com cerca de um passo de antecipação, oferecendo-lhe assim uma distância



Figura 6.7: Decorrer dos testes de campo realizados por invisuais.

de reacção razoável, mesmo para velocidades de marcha um pouco acima da média.

Relativamente às varetas laterais, foram todos da opinião que estas não apresentam grande utilidade, apesar das alterações efectuadas desde a última versão. Durante o decorrer dos testes com os cegos, apenas por uma vez as varetas demonstraram algum efeito, ao detectar um obstáculo baixo que sem elas provavelmente passaria despercebido e poderia apresentar algum perigo.

A impressão que a bengala causou aos cegos foi tão positiva, que o ponto mais negativo que estes apontaram prendeu-se com questões de construção mecânica da mesma (excesso de peso, principalmente). Sendo este um protótipo cujo intuito consiste em testar o conceito de detecção de desníveis através de ultra-sons, não foi dado grande ênfase a esses aspectos (embora já tenham sido feitas melhorias relativamente ao protótipo anterior).

Com a versão actual, houve alguns cegos que já ficaram bastante satisfeitos com o desempenho da bengala, no entanto ainda existe alguma margem de progressão que poderá tornar a bengala realmente eficaz e fiável. Todos estes resultados e opiniões demonstraram a possível viabilidade deste produto a nível comercial (em termos de funcionalidade e utilidade), oferecendo assim uma grande motivação para continuar o seu desenvolvimento.

Capítulo 7

Conclusões e trabalho futuro

7.1 Conclusões

Os resultados que foram obtidos nos diversos testes realizados ao longo do desenvolvimento desta tecnologia demonstraram que os objectivos propostos para este projecto foram alcançados com sucesso.

De um ponto de vista qualitativo, foi obtido um avanço significativo na detecção de desníveis por parte da bengala, demonstrando mais robustez, fiabilidade e segurança aos seus utilizadores quando comparada com a versão desenvolvida anteriormente. Como os resultados que existiam para a versão de 2008 não estavam quantificados, desenvolveu-se uma plataforma capaz de o fazer. Assim, foi possível demonstrar a evolução alcançada e deixar um registo concreto das capacidades da bengala, permitindo um desenvolvimento objectivo.

Construiu-se um protótipo inteiramente novo, mais cómodo para testar em situações reais novos algoritmos que possam vir a ser desenvolvidos no futuro. Apesar de não incorporar duas importantes funcionalidades implementadas no protótipo de 2008 (LEDs para alerta de presença e painel solar), a nova versão foi preparada para poder integrar facilmente estes módulos.

Durante o desenvolvimento da bengala foi testado um sensor óptico como alternativa/complemento aos sensores ultra-sónicos. No entanto, estes provaram ser ineficazes, já que o seu comportamento era imprevisível quando na presença de uma luminosidade solar intensa. Não foi possível testar com sucesso o uso de mais do que dois receptores de ultra-sons, no entanto, o algoritmo de processamento de sinal desenvolvido dispensa o uso de mais transdutores, apresentando um bom desempenho com apenas dois.

Relativamente ao consumo energético, os resultados obtidos demonstraram que o sistema possui uma elevada autonomia, validando o uso de duas pilhas recarregáveis AAA como fonte de energia. Numa versão posterior, com a inserção de um painel solar, a autonomia poderá ainda ser maior, reduzindo o número de vezes que o utilizador terá que recarregar as pilhas. Estes factores são essenciais para o sucesso da bengala enquanto produto comercial, já que a necessidade de recarregar repetidamente a bengala acaba por torná-la pouco prática para o utilizador.

Fazendo uma apreciação final sobre o futuro da bengala, considera-se que esta tem potencial para se tornar num bem útil para os cegos, aumentando consideravelmente a sua segurança enquanto se deslocam. Embora ainda haja outro tipo de funcionalidades que se pretende implementar na bengala, e.g. detecção de obstáculos acima da cintura, a detecção de

desníveis no solo provou ser eficaz e bastante fiável. Os cegos que experimentaram a bengala ficaram bastante satisfeitos e apontaram apenas alguns aspectos que devem ser melhorados antes de poder comercializar esta ideia. Esses aspectos serão apresentados em seguida, juntamente com outros que foram encontrados ao longo do projecto e que podem contribuir para uma maior robustez do sistema.

7.2 Aspectos a melhorar

Como foi explicado, existem ainda alguns aspectos a melhorar na bengala que deverão ser considerados no futuro. Em termos de algoritmo, já foram referenciados alguns dos problemas e possíveis soluções no capítulo 5, que consistem em: eliminar o módulo de detecção da envolvente dos pulsos recebidos e realizar uma amostragem de 2ª ordem de modo a não perder informação importante do sinal; integrar um acelerómetro vertical para que a detecção de desníveis se torne imune ao tipo de movimento aplicado à bengala; estudar mais pormenorizadamente o efeito das pancadas no sinal, de forma a evitar que estas acusem falsos alertas; por fim, eliminar o acoplamento directo de sinal por software, permitindo assim uma montagem mais compacta dos transdutores e impedir a ocorrência de erros devido a pequenas alterações na posição dos mesmos.

Como o principal foco do trabalho consistia em melhorar o algoritmo de detecção de desníveis, não foram tidas grandes considerações sobre o hardware. No entanto, alguns dos circuitos integrados usados não eram os mais indicados para sistemas de baixo-consumo, sendo portanto necessário, no futuro, estudar alternativas melhores para o efeito. Deverá também ser adoptada a tecnologia SMD para todos os componentes. Com esta, as dimensões do circuito poderão ser diminuídas, possibilitando a inserção do PCB dentro do cano da bengala, tornando-a esteticamente mais apelativa.

Nesta versão, a única funcionalidade da bengala consistia em alertar o utilizador da presença de desníveis no solo. Para o efeito, era simplesmente accionado o motor vibratório. Não foram tidas preocupações com o interface com o utilizador, mas poderão haver outras formas mais eficazes de o alertar, ou dar informações mais específicas sobre o tipo de desníveis. Deverá portanto ser estudada qual a informação relevante a transmitir aos utilizadores e qual a melhor forma de o fazer.

Mesmo em dias de chuva, os cegos saem à rua com as suas bengalas. Este factor torna essencial o uso de transdutores de ultra-sons à prova de água na versão final da bengala. Também será conveniente estudar o efeito da chuva na medição da distância ao solo, pois é sabido que o funcionamento da Ultra-Cane (baseada em ultra-sons) é afectado pela chuva, tornando-se inútil para os seus utilizadores.

Embora um protótipo leve, prático e discreto seja mais cómodo para os cegos testarem, não era esse o objectivo neste estágio de desenvolvimento. Requeria-se um protótipo capaz de testar o algoritmo de detecção de desníveis, usando-o na rua como se de uma bengala branca normal se tratasse. No entanto, apesar de o dia de testes realizado com os cegos ter ajudado a perceber muita coisa, seria mais interessante e produtivo emprestar-lhes o protótipo para eles levarem consigo e experimentarem-no durante alguns dias na sua vida quotidiana (tal como foi feito com o primeiro protótipo das varetas laterais). Desta forma eles conseguiriam apontar muitos mais defeitos e virtudes e pormenores a alterar/acrescentar. Aí já será necessário construir o protótipo mais leve, prático e discreto. Será igualmente necessário montar os transdutores numa disposição mais protegida para que os cegos possam manusear a

bengala com total confiança e sem receios, tal como fariam com a sua própria bengala branca. Escusado será dizer que numa versão comercial estes aspectos serão imperativos.

Bibliografia

- [1] Brain Port Vision. <http://vision.wicab.com/>.
- [2] BS.player. <http://www.bsplayer.org/>.
- [3] World access for the blind. <http://www.worldaccessfortheblind.org/>.
- [4] Servomechanism. <http://en.wikipedia.org/wiki/Servomechanism>, January 2009.
- [5] Ultrasound and microcontroller applications. <http://www.hexamite.com/hetheory.htm>, January 2009.
- [6] S. Graziani B. Andò. Multisensor strategies to assist blind people: A clear-path indicator. *IEEE Instrumentation and Measurement Society*, May 2004.
- [7] Leland B. Jackson. *Signals, Systems and Transforms*. Addison-Wesley, University of Rhode Island, 1991.
- [8] Nuno Dias. A low cost and low-power hole-detecting cane for the visually impaired. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2008.
- [9] V. Koudriavtsev. *O mundo do ultra-sons*. Publicações Europa-América.
- [10] Committee on Vision. *Electronic Travel Aids: New Directions for Research*. Washington, DC: Nat. Acad. Press, 1986.
- [11] Henry W. Ott. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1988.
- [12] Sedra & Smith. *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press Inc., 5nd edition, 2003.

Apêndice A

Outras tecnologias de apoio a cegos

A Tabela A.1 contém a descrição das especificações mais relevantes de diversos sistemas electrónicos de apoio à mobilidade de cegos. Estas informações foram retiradas na maioria de [8], com excepção das últimas três tecnologias e algumas actualizações.

Produto	Tipo	Função Principal	Sensores	Interface	Alimentação	Características	Preço
UltraCane	Bengala	Deteção de obstáculos	Ultra-sons	Vibração	2 pilhas AA	Deteção de obstáculos no chão e acima da cintura	900€
K-Sonar	Dispositivo portátil passível de apetrechar a uma bengala	Deteção de obstáculos	Ultra-sons	Áudio	Pilhas recarregáveis	Permite ao utilizador distinguir os objectos e texturas	\$700
DOPECA	Luva; suplemento à bengala branca	Deteção de obstáculos	Ultra-sons	Vibração	Desconhecido	Detecta obstáculos acima da cintura	Em desenvolvimento
MiniGuide	Dispositivo portátil; suplemento à bengala branca	Deteção de obstáculos	Ultra-sons	Vibração e áudio	Bateria de Lítio do tipo 123	Vários modos de operação seleccionáveis (alcance e sensibilidade)	\$550
LaserCane-2000	Bengala	Deteção de obstáculos e desníveis	Laser	Vibração e áudio	2 pilhas AA	Detecta desníveis, obstáculos ao nível da cabeça e em frente	\$3000
NavBelt e GuideCane	Cinto e bengala com rodas	Deteção e desvio automático de obstáculos	Ultra-sons	Áudio e mecânico	Desconhecido	Conduz o utilizador por caminhos seguros	Em desenvolvimento
Wearable Obstacle detection System	Casaco	Deteção de obstáculos	Ultra-sons	Vibração	Desconhecido	Dispositivo mãos-livres. Informa acerca da direcção dos obstáculos	Desconhecido
Cyarm	Dispositivo portátil	Deteção de obstáculos	Ultra-sons	Mecânico	Desconhecido	Informa qual a distância do obstáculo	Em desenvolvimento
Ultra Body Guard	Dispositivo portátil ou fixável no peito	Deteção de obstáculos	Ultra-sons	Vibração e voz	Desconhecido	Sensor de luz que orienta para fontes de iluminação	Desconhecido
Guido Smart Walker	Veículo guia	Auxílio de navegação e desvio automático de obstáculos	Ultra-sons lasers e encoders nas rodas	Áudio e mecânico	Desconhecido	Evita colisões automaticamente e segue um caminho seguro	Em desenvolvimento
Sonic Pathfinder	Fita para a cabeça	Deteção de obstáculos	Ultra-sons	Áudio	Desconhecido	Dispositivo mãos-livres. Indica qual a direcção do obstáculo	Desconhecido
The vOIce	Óculos escuros	Deteção de obstáculos; percepção do ambiente	Câmara de vídeo	Áudio	Bateria de um computador portátil	Traduz vídeo em som	Software grátis. Requer um computador e uma câmara
BrainPort Vision	Óculos e matriz de eléctrodos para a língua	Deteção de obstáculos; percepção do ambiente	Câmara de vídeo	Pequenos choques eléctricos	Desconhecido	Traduz vídeo em imagem tátil	Em desenvolvimento
Detector de obstáculos	Óculos e apetrecho para a bengala	Deteção de obstáculos	Infra-Vermelho	-	Desconhecido	Indica qual a distância aproximada do obstáculo em frente (a toda a altura)	Em desenvolvimento
FlashSonar	Impulso sonoro	Deteção de obstáculos; percepção do ambiente	Ouvido humano	Áudio	Desconhecido	Permite distinguir formas e tipos de objectos	Em desenvolvimento
Bengala de Apoio a Cegos	Bengala	Deteção de degraus e buraco	Ultra-sons	Vibração	Energia Solar ou 2 pilhas recarregáveis AAA	Alerta de presença em locais escuros; Carrega as pilhas automaticamente quando existe luminosidade solar suficiente	Em desenvolvimento

Tabela A.1: Lista de sistemas electrónicos de apoio à mobilidade de cegos e suas principais características.

Apêndice B

Esquemas dos circuitos



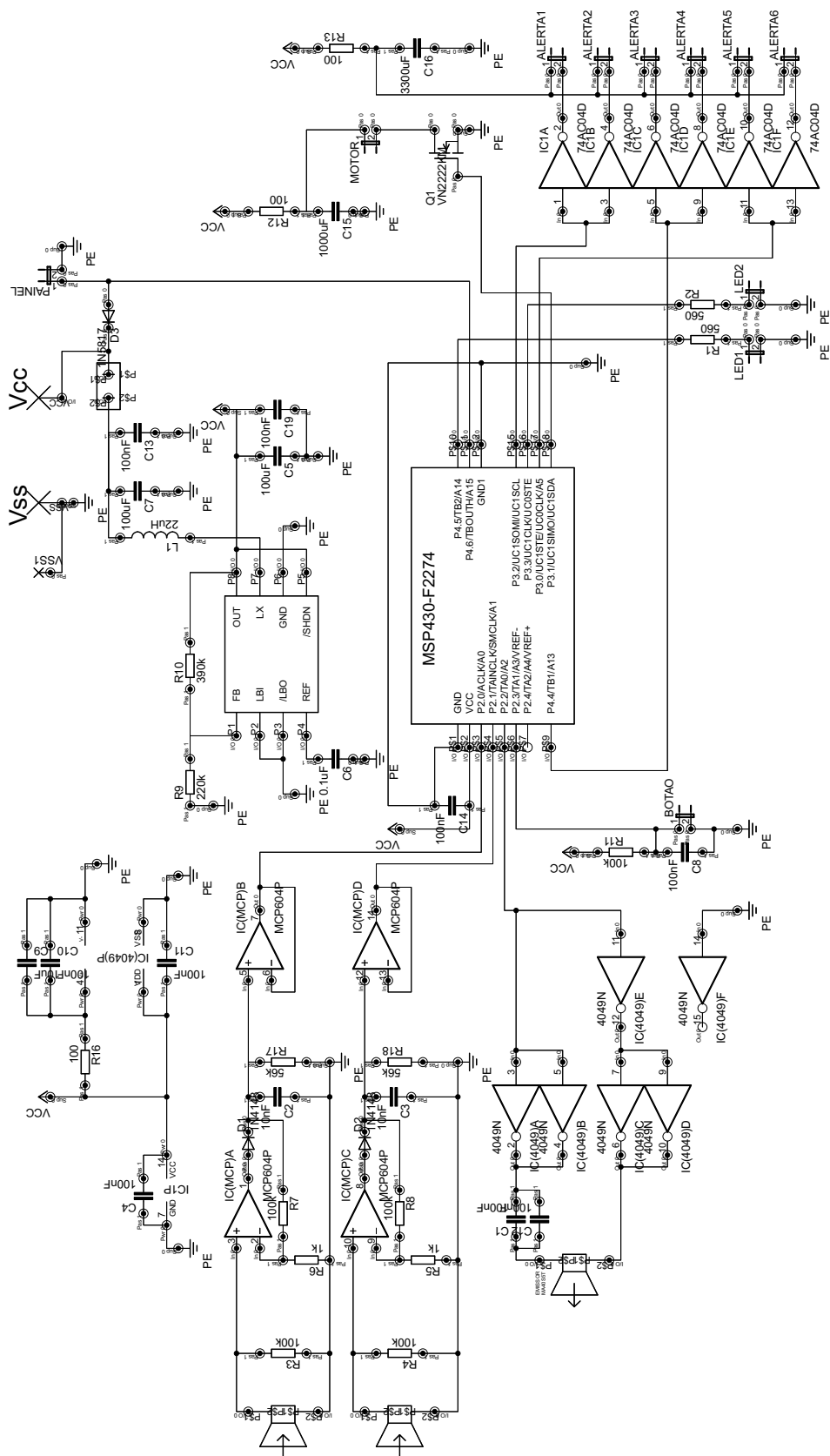


Figura B.2: Esquema do circuito implementado na bengala.

Apêndice C

PCBs



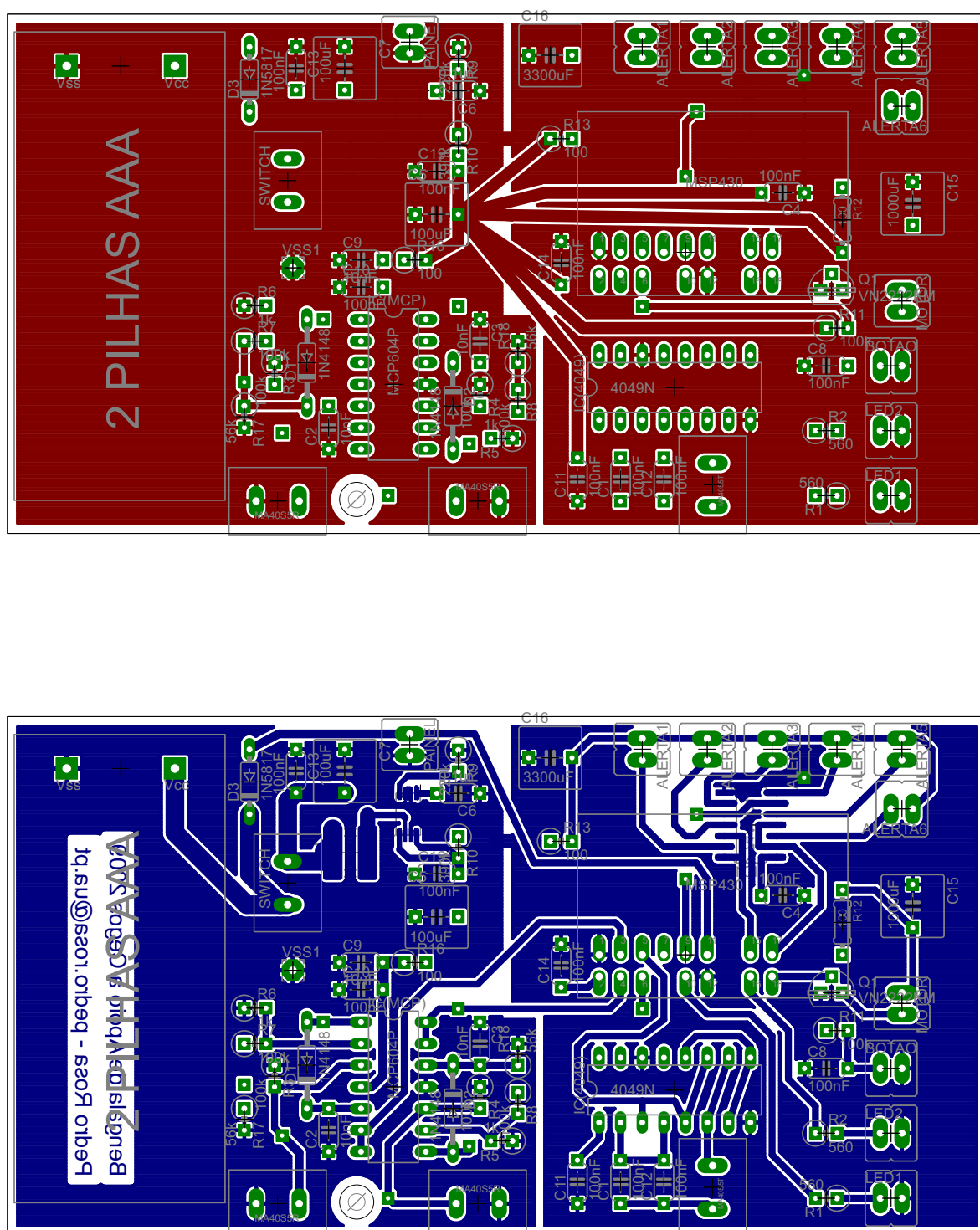
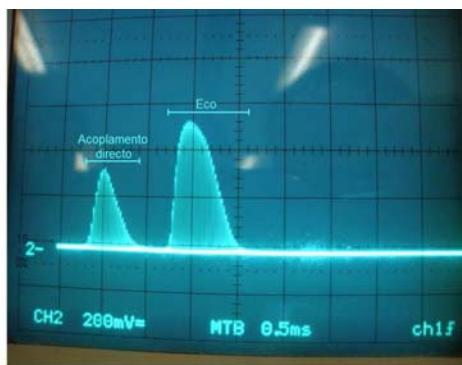


Figura C.2: PCB implementado na bengala (vistas superior e inferior).

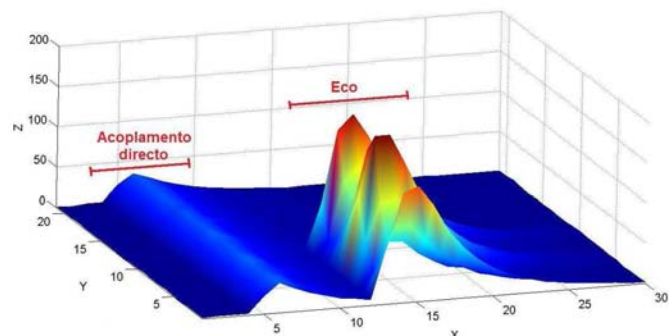
Apêndice D

Acoplamento directo de sinal

O acoplamento directo de sinal entre o emissor e os receptores de ultra-sons ocorre quando o primeiro está a emitir e o segundo a receber. Apesar de ainda não ter sido recebido qualquer eco, é capturado um pulso que facilmente se confunde com o eco. A Figura D.1(a) demonstra claramente este efeito. Já na Figura D.1(b) é possível observar a presença de acoplamento directo ao longo do tempo. Como se verifica, o pulso mantém-se aproximadamente constante, independentemente da presença ou ausência de um eco proveniente de um obstáculo. Se o pulso proveniente do acoplamento directo não for eliminado/ignorado, pode ser entendido como um eco, o que impossibilita a detecção de buracos.



(a)



(b)

Figura D.1: (a) Amostra de um pulso recebido afectado com acoplamento directo de sinal (b) aquisição de pulsos de ultra-sons ao longo do tempo sob o efeito de acoplamento directo.

O acoplamento directo de sinal entre emissor e receptores dá-se tanto pelo ar como por vibrações mecânicas através da estrutura que suporta os transdutores. Sendo assim, existem algumas formas de reduzir significativamente este efeito:

- Inserindo um isolamento acústico entre os transdutores para eliminar o acoplamento directo pelo ar. Esta solução foi implementada na plataforma de testes e a sua montagem encontra-se apresentada na Figura D.2. Este método tem o inconveniente de atenuar o sinal emitido, traduzindo-se num maior número de falhas de ecos;
- Outro método para reduzir o acoplamento através do ar consiste em afastar o máximo

possível o emissor dos receptores, provocando uma maior atenuação do sinal na transmissão directa. Este método foi utilizado no protótipo construído e tem o inconveniente de tornar as dimensões físicas maiores;

- O último método utilizado consiste em fixar os transdutores a uma matéria pouco rígida, e.g. esponja, atenuando o acoplamento de sinal por vias mecânicas. Esta solução também foi implementada no protótipo construído. A montagem usada para implementar estas duas últimas soluções encontra-se apresentada na Figura 6.4.



Figura D.2: Redução do acoplamento directo de sinal através de um tubo de papel a separar o emissor dos receptores.

No entanto, mesmo utilizando estes métodos, é difícil eliminar por completo o acoplamento de sinal em todos os receptores. Para além disso, um pequeno movimento dos transdutores pode alterar significativamente a atenuação do acoplamento directo de sinal. Isto faz com que o bom funcionamento do sistema dependa da correcta montagem dos transdutores e manutenção da mesma, ou seja, qualquer pancada que os transdutores sofram pode tornar o sistema ineficaz. Sendo assim, será necessário encontrar outros métodos mais eficazes para contornar este problema.

Foram testados alguns métodos por software, mas todos apresentaram contrapartidas que impossibilitaram a sua implementação. Apesar de não terem sido utilizados, serão explicados resumidamente para futura referência:

- Uma forma bastante simples de ignorar o pulso proveniente de acoplamento directo consiste em estudar qual o valor máximo atingível por este e ignorar todas as amostras com amplitude inferior. No entanto, para ignorar o acoplamento directo, é igualmente necessário ignorar os ecos mais fracos, tornando mais árdua a tarefa de desenvolver um algoritmo rápido e fiável. Este método foi implementado no algoritmo desenvolvido em 2008, estando descrito em [8];
- Outra solução simples consiste em determinar, em cada pulso recebido, qual o período de tempo afectado pelo acoplamento directo e ignorar as amostras correspondentes. No entanto, devido ao filtro passa-baixo para detecção da envolvente do sinal, o efeito do

pulso pode prolongar-se durante bastante tempo, tornando a distância mínima mensurável muito elevada. Por esta razão, este método é pouco eficaz;

- Por último, tentou-se adaptar o algoritmo de detecção de buracos desenvolvido (secção 5.2.1) à presença de acoplamento directo. Para tal, mediu-se a força do sinal na ausência de eco para determinar o limiar entre sinais com e sem eco. No entanto, na presença de acoplamento directo, o desvio padrão da força do sinal era cerca de três vezes superior àquele medido sem acoplamento. Isto obrigava à atribuição de um limiar de decisão com uma margem de erro maior, o que iria aumentar significativamente o número de falhas de eco, obrigando a um atraso maior na detecção de obstáculos.

Por estas razões, foram descartadas as soluções por software e implementadas apenas as mecânicas.